

Možnosti měření profilu optického svazku

Measurement of Optical Beam Profile

Souhlasím se zveřejněním této diplomové práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 *Studijního a zkušebního řádu pro studium v magisterských programech VŠB-TU Ostrava*.

V Ostravě 30. dubna 2011

.....

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 30. dubna 2011

.....

Rád bych na tomto místě poděkoval členům mé rodiny za trpělivost a podporu, spolužákům, kteří mi vždy ochotně poskytli nový pohled na věc a samozřejmě mému vedoucímu diplomové práce za vedení a cenné rady.

Abstrakt

V této diplomové práci jsou popsány a realizovány metody pro měření profilu optického svazku. Byly realizovány tři metody: scanning pinhole, knife-edge a měření pomocí CCD kamery. Všechny metody byly navrženy tak, aby je bylo možno co nejvíce propojit s aplikací Matlab.

Součástí práce jsou rovněž experimentální měření provedená pro každou metodu.

Klíčová slova: profil optického svazku, laser, scanning pinhole, knife-edge, CCD kamera, Matlab, Thorlabs

Abstract

In this master thesis, methods for measuring of optical beam profile are described and implemented. These three methods have been created: scanning pinhole, knife-edge and CCD camera measurement. All of the methods have been designed for the most effective connection with Matlab software.

This thesis also contains experimental measurements for all created methods.

Keywords: optical beam profile, scanning pinhole, knife-edge, CCD camera, Matlab, Thorlabs

Seznam použitých zkratek a symbolů

a.u.	– arbitrary units
CCD	– Charge Coupled Device
GUI	– Graphical User Interface
IR	– InfraRed
ND	– Neutral Density
PC	– Personal Computer
UV	– UltraViolet

Obsah

1	Úvod	7
2	Profil optického svazku	8
2.1	Profily v optické komunikaci	8
2.2	Profily v průmyslovém nasazení	8
3	Vlastnosti optického svazku	14
3.1	Parametry svazku	14
3.2	Kvalita svazku	16
4	Neelektrické metody	18
4.1	Odrazem od plochy	18
4.2	Vypálení do papíru	18
4.3	Fluorescenční desky	18
4.4	Vypálení profilu do akrylové kostky	20
5	Mechanicko-elektrické metody	21
5.1	Metoda knife-edge	21
5.2	Metody scanning pinhole a scanning slit	21
5.3	BeamMaster knife-edge	21
6	CCD kamery	25
6.1	Software	25
6.2	Parametry CCD kamer	25
6.3	Thorlabs CCD kamera Beam Profiler	28
7	Realizovaná metoda scanning pinhole	30
7.1	Pracoviště	30
7.2	Software	32
7.3	Experimentální měření	39
8	Realizovaná metoda CCD kamera	42
8.1	Pracoviště	42
8.2	Software	43
8.3	Experimentální měření	44
9	Realizovaná metoda knife-edge	49
9.1	Pracoviště	49
9.2	Software	49
9.3	Experimentální měření	51
10	Závěr	55
11	Reference	56

Přílohy	57
----------------	-----------

A Obsah CD	58
-------------------	-----------

Seznam tabulek

1	Příklady hodnot M^2	17
2	Parametry kamery	44

Seznam obrázků

1	Ideální tvar Gaussova svazku [14]	9
2	Ideální tvar plochého svazku [14]	9
3	Reálný tvar Gaussova svazku [14]	10
4	Reálný tvar plochého svazku [14]	10
5	Kolimovaný laserový svazek [14]	11
6	Špatně navázaný svazek do vlákna [14]	11
7	Dobře navázaný svazek do vlákna [14]	12
8	Nevhodný profil CO ₂ laseru [14]	12
9	Správně nastavený profil CO ₂ laseru [14]	13
10	Beam radius [2]	15
11	Beam waist, w_0 = pás svazku, Θ = divergence svazku [4]	15
12	Vztah BPP a M^2 [3]	17
13	Profil laserového svazku svítícího na zeď [14]	19
14	Papír ozářený laserem [14]	19
15	Vypálení profilu do akrylové kostky [14]	20
16	Princip metody knife-edge	22
17	Princip metody scanning slit [14]	22
18	Princip metody scanning pinhole	23
19	Produkt BeamMaster knife-edge [15]	24
20	Princip multi knife-edge [15]	24
21	Příklad grafu vytvořeného v GNUPlot [10]	26
22	Příklad grafu znázorňující citlivost kamery při různých λ [5]	27
23	Příklad grafu znázorňující citlivost pixelů kamery při různých λ [5]	27
24	Závislost výkonu na šířce svazku [5]	28
25	Thorlabs kamera pro měření optického svazku [5]	29
26	Uživatelský interface [5]	29
27	Princip metody pinhole	31
28	Pracoviště metody pinhole	32
29	Využití dvou elektrických motorků	33
30	10 μ m pinhole	34
31	Motorek Z812 a jeho ovladač T-Cube TDC001	35
32	Driver pro laserovou diodu	36
33	GUI aplikace APT Config	37
34	GUI aplikace APT User	38
35	GUI aplikace pro měření metodou pinhole	40
36	Změřený profil laserové diody RLT650-200G	40
37	Změřený profil laserové diody ADL-65075TA2	41
38	Změřený profil laseru MELLES GRIOT 25-LHP-151-230	41
39	Přípravek pro měření CCD kamerou	43
40	Sada filtrů	45
41	Význam čísla ND a závislost propustnosti na vlnové délce [6]	45
42	Vliv filtru na kvalitu grafu	46

43	GUI aplikace pro ovládání kamery	47
44	Graf při přesaturování CCD čipu	47
45	Profilu laseru MELLES GRIOT 25-LHP-151-230 získaný pomocí CCD kamery	48
46	Uživatelské rozhraní pro ovládání motorku u metody knife-edge	50
47	Graf naměřených hodnot postupného zakrývání svazku	52
48	Grafy diferencí	52
49	Návod pro provedení regrese v nástroji Curve fitting tool	53
50	Profil optického svazku laseru MELLES GRIOT 25-LHP-151-230 změřeného metodou knife-edge, vlevo v ose 0° , vpravo v ose $+90^\circ$	54

Seznam výpisů zdrojového kódu

1	Vytvoření ActiveX prvku	34
2	Ukázka volání metody	34
3	Vytvoření komunikace přes sériovou linku	34
4	Původní cyklus pro pohyb motorků	37
5	Finální použitý cyklus pro ovládání motorků	38
6	Uložení snímku jako matice hodnot typu double	43
7	Cyklus pro ovládání motorku u metody knife-edge	49
8	Příprava dat pro regresi	51
9	Zpracování dat z regrese	51
10	Výpočet radiusu optického svazku	51

1 Úvod

Měření profilu optického svazku se nejčastěji zmiňuje ve spojení s laserovými zdroji světla. Existuje mnoho aplikací laseru, kde je potřeba znát, případně průběžně sledovat profil svazku. Pro některé aplikace je nutné znát výsledný profil svazku už při návrhu daného laseru. Při mnoha vědeckých aplikacích se lasery tlačí na kraj jejich schopností, je proto nutné sledovat, zda původní profil ještě vůbec existuje nebo jestli se nějak významně nezměnil. V lékařských aplikacích laseru je nutné před použitím důkladně otestovat, zda má profil svazku požadovaný tvar a nemá tendenci jej při používání měnit. V optických komunikacích je dobré znát profil optického svazku pro přesnější navázání světla do vlákna. V poslední době velmi rozšířená a nejdynamičtější se rozvíjející oblast užití optických vláken je užití vláken jako různých senzorů. Právě při této aplikaci se využívá porovnávání změny profilu optického svazku.

Cílem této diplomové práce je prozkoumat a vytvořit metody pro měření profilu optického svazku.

Práce je rozdělena do dvou částí. Kapitoly 2 až 6 obsahují teoretický rozbor dané problematiky. Věnují se vlastnostem optického svazku a popisují metody pro měření profilu optického svazku. V kapitolách 7 až 9 jsou popsány mnou realizované metody. Součástí těchto kapitol jsou také výsledky experimentálního měření provedeného pro každou metodu.

2 Profil optického svazku

Profil optického svazku ovlivňuje hustotu energie, koncentraci a kolimaci světelného svazku. Také významně ovlivňuje, jakým způsobem se bude světlo šířit určitým prostředím. Obrázky 1 a 2 ukazují dva ideální profily laserového svazku. Obrázek 1 ukazuje Gaussův svazek, tzn. nejvyšší výkon je uprostřed svazku. Obrázek 2 potom velice rovnoměrné rozprostření výkonu po celé ploše optického svazku.

Lasery však většinou nejsou ideální, jak ukazuje obrázek 3, profil svazku se sice blíží profilu ideálního Gaussova svazku, ale špička je mírně zkreslená. Laserový svazek nemá nejvyšší výkon uprostřed, ale je rozprostřen více do celé plochy svazku. Obrázek 4 potom ukazuje reálnější tvar plochého profilu svazku, kdy opět není výkon svazku rovnoměrně rozložena do celé plochy, ale vrchol je zešikmený, tedy na jedné straně svazku je optický výkon menší než na druhé.

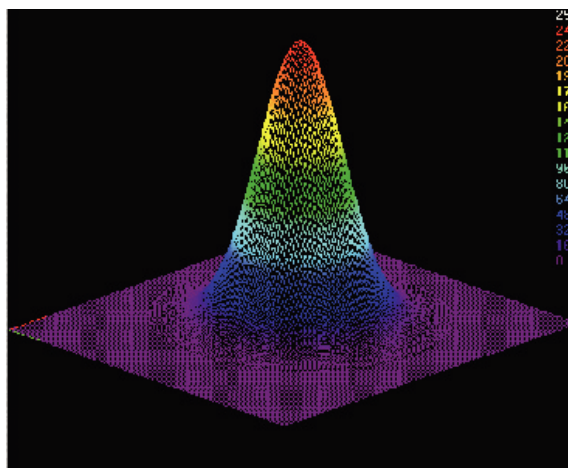
Tvar optického svazku můžeme ovlivnit například použitím kolimátoru. Obrázek 5 ukazuje profil kolimovaného laserového svazku. Je vidět, že tvar se blíží téměř ideálnímu tvaru Gaussova profilu svazku.

2.1 Profily v optické komunikaci

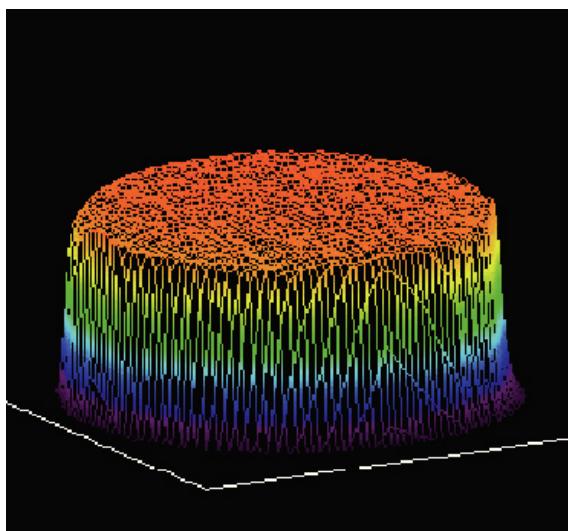
Následující obrázky 6 a 7 ukazují, jak vypadá svazek na výstupu z optického vlákna. Obrázek 6 ukazuje, jak vypadá výstupní profil optického svazku, pokud špatně navážeme svazek do vlákna. Je vidět velký výkon na okraji optického svazku. Bylo to způsobeno tím, že se velká část svazku šířila pláštěm. Šíření svazku pláštěm má za následek větší útlum a větší riziko vyvázání části svazku z vlákna, například při ohybu. Obrázek 7 ukazuje, jak vypadá profil, když svazek navážeme správně, tedy že většina výkonu je blízko středu optického svazku. To znamená, že se svazek šířil převážně jádrem optického vlákna.

2.2 Profily v průmyslovém nasazení

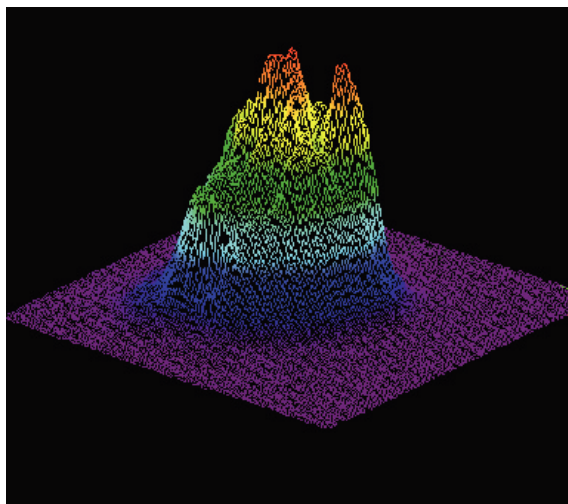
V průmyslu se většinou používají vysoce výkonné lasery. Tyto lasery slouží například k vrtání, řezání a svařování. Při těchto činnostech je tvar profilu velice důležitý, protože ovlivňuje tvar řezu, či vyvrtaného otvoru. Například Nd:YAG laser s dvojitém vrcholem umožňuje jinou šířku řezu ve směru X než ve směru Y. Na obrázcích 8 a 9 je vidět špatně a dobře nastavený profil CO₂ laseru, který se používá např. k řezání či rytí. Tvar profilu je proto důležitý, aby výsledná rytina měla co nejpřesnější předpokládaný tvar.



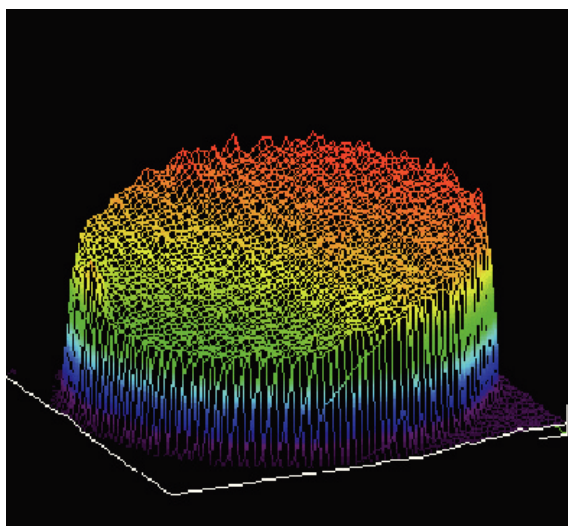
Obrázek 1: Ideální tvar Gaussova svazku [14]



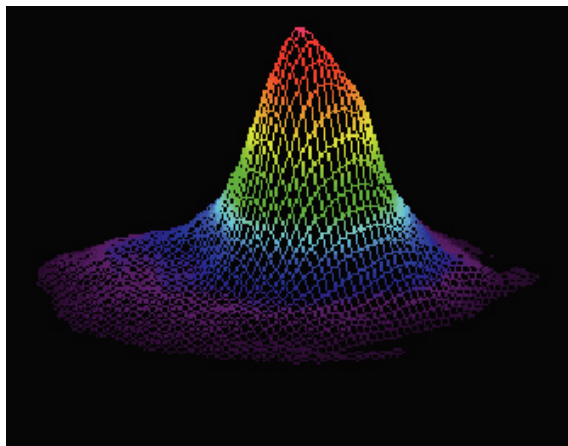
Obrázek 2: Ideální tvar plochého svazku [14]



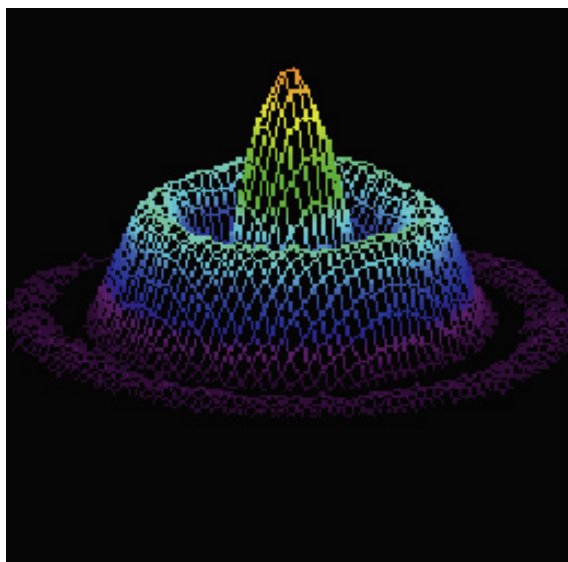
Obrázek 3: Reálný tvar Gaussova svazku [14]



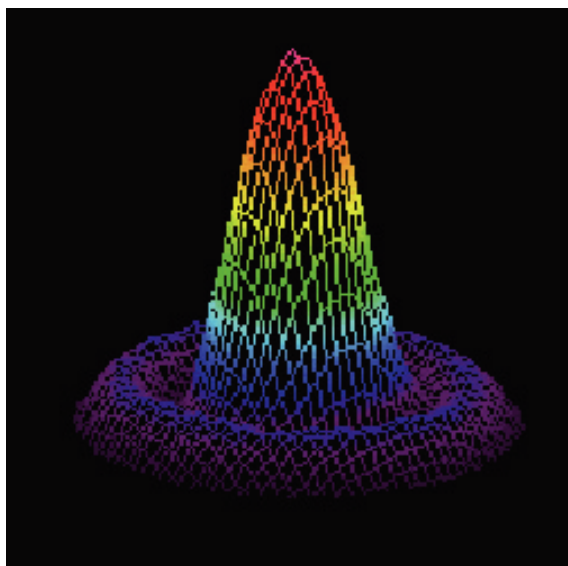
Obrázek 4: Reálný tvar plochého svazku [14]



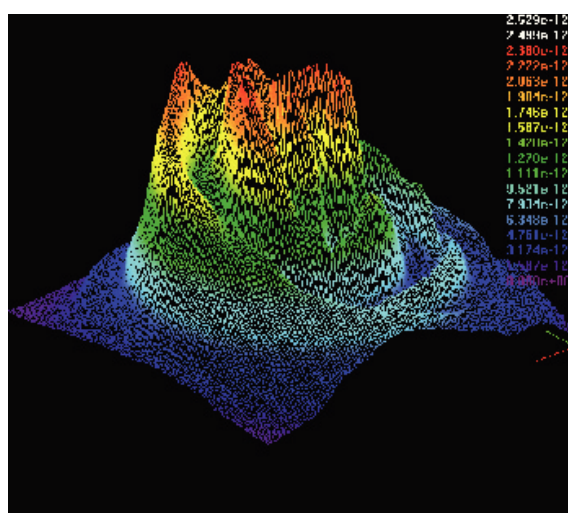
Obrázek 5: Kolimovaný laserový svazek [14]



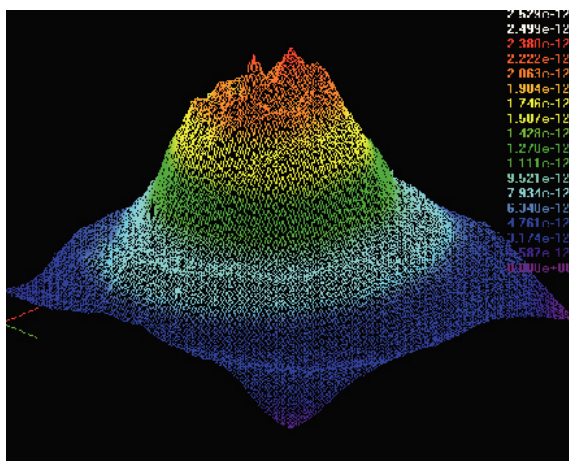
Obrázek 6: Špatně navázaný svazek do vlákna [14]



Obrázek 7: Dobře navázaný svazek do vlákna [14]



Obrázek 8: Nevhodný profil CO_2 laseru [14]



Obrázek 9: Správně nastavený profil CO₂ laseru [14]

3 Vlastnosti optického svazku

Pro popisování jednotlivých optických svazků musíme stanovit určitá kritéria a parametry. Základní vlastností pro popis optického svazku je kvalita svazku. Abychom však mohli popsat, co to kvalita svazku znamená, musíme nejdříve vysvětlit několik základních parametrů týkajících se optického svazku.

3.1 Parametry svazku

V této podkapitole bude zmíněno několik základních parametrů optického svazku, které se používají pro jeho popis.

3.1.1 Beam radius

Beam radius, nebo-li poloměr svazku, vyjadřuje vzdálenost od osy svazku, kde výkon poklesne pod $1/e^2$ (13,5%) celkového výkonu svazku. Další možností, jak popsat tento parametr, je tuto vzdálenost nepočítat v místě, kde výkon klesne na $1/e^2$, ale v místě tzv. FWHM. FWHM (Full width at half-maximum) vyjadřuje hodnotu, kde výkon svazku klesne přesně na polovinu maxima. Tento parametr je popsán na obrázku 10. Rovněž je na obrázku dobře vidět úskalí použití FWHM, i když se jedná o dva rozdílné svazky, v místě FWHM mají stejný rádius. Mohlo by se tedy zdát, že se jedná o totožné optické svazky. Když se však podíváme na rádius v místě poklesu výkonu na $1/e^2$, je zřetelné, že jsou to dva rozdílné optické svazky. Proto považujeme metodu určení radiusu optického svazku v místě poklesu výkonu na $1/e^2$ za přesnější. V tomto bodě se totiž už většinou projeví rozdílný tvar profilu optického svazku.

3.1.2 Beam waist

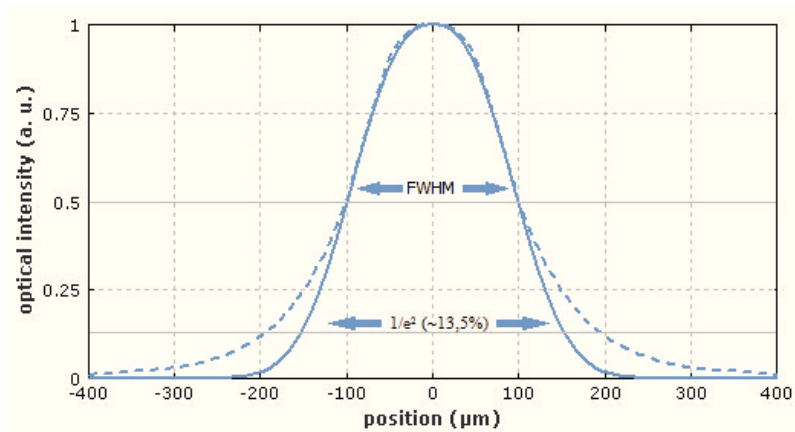
Beam waist, nebo-li pás svazku, je místo, kde má rádius svazku nejmenší hodnotu. Tento parametr je znázorněn na obrázku 11.

3.1.3 Beam divergence

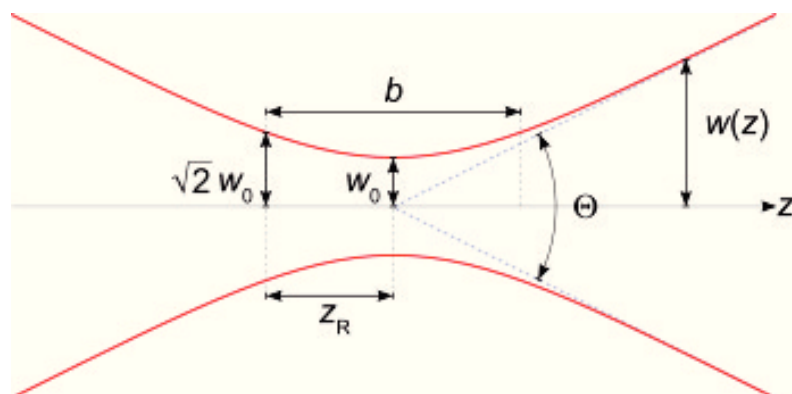
Divergence svazku je úhel, který udává, jak rychle se svazek rozšiřuje z pásu svazku. Znázornění můžeme vidět na obrázku 11.

Častěji zmiňovaným parametrem, hlavně v souvislosti s parametrem kvality M^2 , je poloviční divergenční úhel θ . Pro svazky s malou divergencí je θ vyjádřena takto:

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi \cdot w_0} [1]$$



Obrázek 10: Beam radius [2]



Obrázek 11: Beam waist, w_0 = pás svazku, Θ = divergence svazku [4]

Pro svazky s velkou divergencí je poloviční divergenční úhel vyjádřen takto:

$$\theta = M^2 \frac{\lambda}{\pi \cdot w_0} [1]$$

Parametr M^2 se nazývá faktor kvality a bude vysvětlen níže.

w_0 - pás svazku.

λ - vlnová délka

3.2 Kvalita svazku

Tento parametr může být vykládán různými způsoby. Můžeme však říci, že kvalitu svazku určuje, jak přesně může být svazek zaostřen za určitých specifických podmínek. Dvěma nejpoužívanějšími způsoby, jak "změřit" kvalitu svazku jsou:

- BPP - Beam parametr product - Souhrnný parametr svazku
- M^2 faktor kvality

3.2.1 BPP - Beam parametr product - Souhrnný parametr svazku

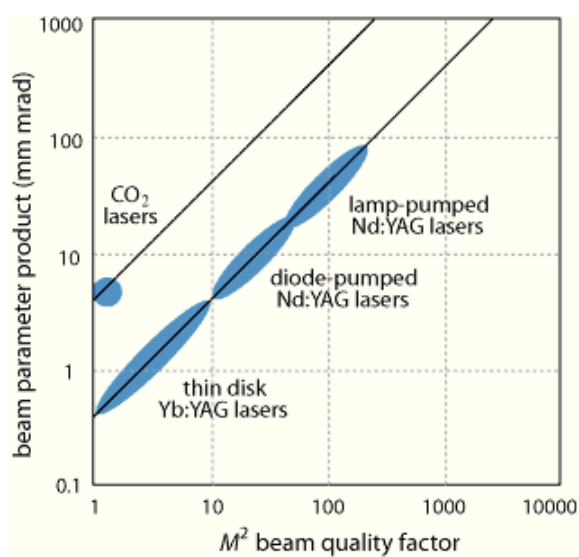
BPP je definován jako součin radiusu a polovičního divergenčního úhlu svazku. Ve vztahu ke kvalitě svazku platí, že čím vyšší je tento parametr, tím je kvalita svazku nižší.

Gaussův profil považujeme za ideální tvar optického svazku, má tedy nejnížší možný BPP.

3.2.2 M^2 faktor kvality

Za ideální tvar profilu laserového svazku považujeme Gaussův profil svazku, který je vidět na obrázku 1. Aby bylo možné nějakým způsobem objektivně popsat odchylku reálného svazku od toho teoretického Gaussova, vznikl parametr M^2 . Je to v podstatě poměr BPP skutečného svazku k svazku Gaussovu při stejné vlnové délce. Jelikož se nám při tomto výpočtu vlnové délky vykrátí, říkáme, že M^2 je spektrálně nezávislý parametr kvality svazku. Vztah BPP k M^2 je vidět na obrázku 12.

Teoretický gaussovský svazek má hodnotu $M^2=1$. Nižší hodnota než 1 je fyzikálně nemožná. Příklady hodnot parametru M^2 jsou vidět v tabulce 1.



Obrázek 12: Vztah BPP a M^2 [3]

Typ	M^2
Teoretický gaussovský	1
HeNe laser	$>1,1$
Ion laser	1,1 - 1,3
TEM00 laser diody	1,1 - 1,7
Vysoce výkonné lasery	3 - 4

Tabulka 1: Příklady hodnot M^2

4 Neelektrické metody

Existuje velké množství neelektrických metod pro měření profilu laserového svazku. Tyto metody existují od dob, kdy se lasery začaly poprvé používat. V této kapitole bude zmíněno jen několik z nich.

4.1 Odrazem od plochy

Nejjednodušším a zároveň nejlevnějším způsobem pro zobrazení laserového svazku je nechat ho odrazit od zdi nebo jiného předmětu. Problémem této metody je, že pro zpracování promítnutého profilu se používá pouze lidské oko a to není schopno rozlišit více než 8-12 odstínů šedi. Proto je nemožné, aby tato metoda, tedy metoda pouhou vizuální kontrolou lidským okem, měla nějakou větší vypovídající váhu a byla použita pro relevantní měření optického svazku a jeho tvaru. Měření šířky svazku pouhým okem, může mít až 100% chybu.

Na obrázku 13 je vidět fotografie odraženého svazku HeNe laseru. Film má ještě menší dynamický rozsah než oko, přesto je na obrázku vidět velký výkon koncentrovaný uprostřed svazku, ale zároveň také poměrně vysoký výkon daleko od středu. Problémem je, že tyto struktury daleko od centra lze brát už jako chybu, či nepřesnost laserového svazku, a představují přibližně jen 1% celkového výkonu světelného svazku vyzářeného laserem. Přesto lidské oko vnímá a fotografický film zobrazuje tyto okrajové struktury jako téměř rovnocenné těm uprostřed svazku.

4.2 Vypálení do papíru

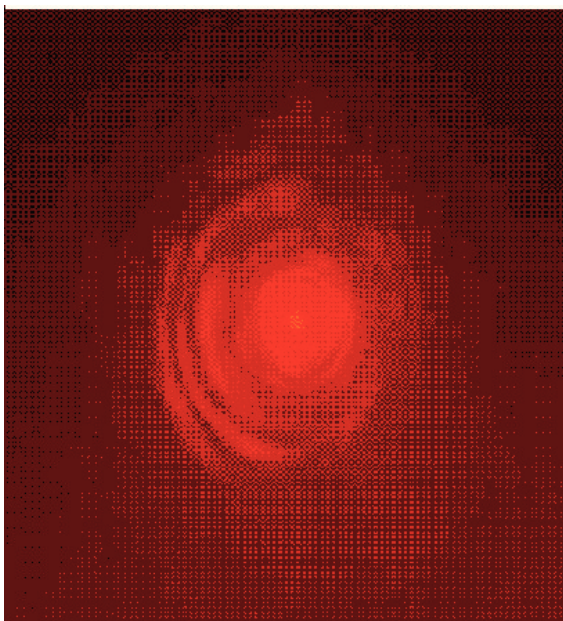
Další neelektrickou možností je "vypalovací papír" nebo polaroidový film. Tuto metodu ilustruje obrázek 14. Je na něm vypalovací papír osvětlený laserem. Tyto typy papírů mají dynamický rozsah 3, tzn.:

- nespálený papír
- zčernalý papír
- papír shořel na popel

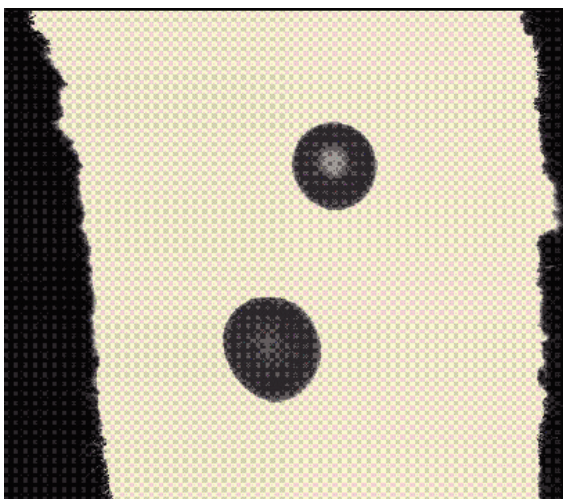
Hlavním problémem této metody je doba trvání ozáření papíru. I když ozařujeme stejný bod stále stejným výkonem, velikost vypáleného bodu se s rostoucí dobou expozice zvětšuje. Toto zvětšení může být i $\pm 50\%$. Je proto důležité pro objektivní měření dodržovat určitou dobu expozice. Tato doba závisí na výkonu laseru, ale také na citlivosti daného papíru.

4.3 Fluorescenční desky

Fluorescenční desky lze použít pro zobrazení svazku UV a IR laseru. Můžeme tedy pomocí těchto desek převést dané svazky do viditelné oblasti. Nevýhodou je opět malý dynamický rozsah, jako tomu bylo u promítání na zeď a sledování lidským okem.



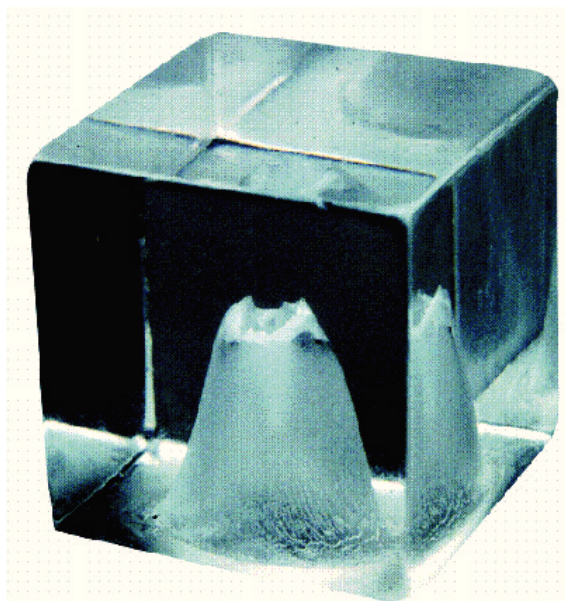
Obrázek 13: Profil laserového svazku svítícího na zeď [14]



Obrázek 14: Papír ozářený laserem [14]

4.4 Vypálení profilu do akrylové kostky

Poslední zmíněnou metodou, je metoda vypálení profilu do akrylové kostky. Tato metoda je určena pouze pro CO₂ lasery. Nicméně ukazuje výborné prostorové zobrazení profilu laserového svazku. Ukázka této metody je na obrázku 15. Čím větší díra je do kostky vypálena, tím je větší výkon záření v daném bodě. Velkým problémem je, že toto měření neprobíhá v reálném čase a také vznik toxických látek při vypalování akrylu.



Obrázek 15: Vypálení profilu do akrylové kostky [14]

5 Mechanicko-elektrické metody

Existují v zásadě dvě používané mechanicko-elektrické metody měření optického svazku. Prvním používanou metodou byla metoda knife-edge (hrana nože). Druhou metodou je metoda využívající tzv. pinhole (díрка). Určitou kombinací těchto metod je metoda využívající tzv. slit, nebo-li štěrbinu. Výhodou těchto metod je, že umožňuje měření i silných laserů bez použití různých filtrů, zeslabujících optický výkon. Toto platí hlavně při použití štěrbinu nebo dírky, jelikož projde vždy jen část z celkového výkonu. U metody knife-edge je to složitější, jelikož dochází v krajní poloze k úplnému odkrytí svazku, tedy k záření v plném výkonu laseru. Hlavní výhodou měření laserového svazku bez použití filtru je, že nepřijdeme o krajní struktury profilu, kde je již výkon tak nízký, že by byl v daných místech svazek filtrem zcela utlumen.

Zatímco rozlišení celého systému je u štěrbinu / dírky dáno také velikostí řezů, tak v případě "hrany nože" jej ovlivňuje pouze velikost kroku posuvu hrany.

5.1 Metoda knife-edge

Tato technika měření profilu svazku je jedna z prvních používaných. Jednoduché znázornění této metody je vidět na obrázku 16. Princip této metody spočívá v tom, že se postupně laserový svazek zakrývá, případně odkrývá a zjišťuje se výkon zbylé části svazku až do úplného odkrytí případně zakrytí. Pomocí difference mezi jednotlivými naměřenými hodnotami se potom zjistí optický výkon v jednotlivých bodech svazku. Problémem této metody je, že předpokládá ideální rozložení celkového výkonu svazku, tedy předpokládá tvar profilu svazku podobný tomu gaussovskému. V případě laseru s více než dvěma špičkami, tedy že se výkon nekonzcentruje pouze do jednoho bodu, by mohl nastat problém s dopočítáváním výkonů v jednotlivých bodech svazku. Pokud chceme získat prostorový náhled na tvar profilu, musíme provádět měření minimálně ve dvou osách. Čím více os proměříme, tím přesnější tvar profilu získáme.

5.2 Metody scanning pinhole a scanning slit

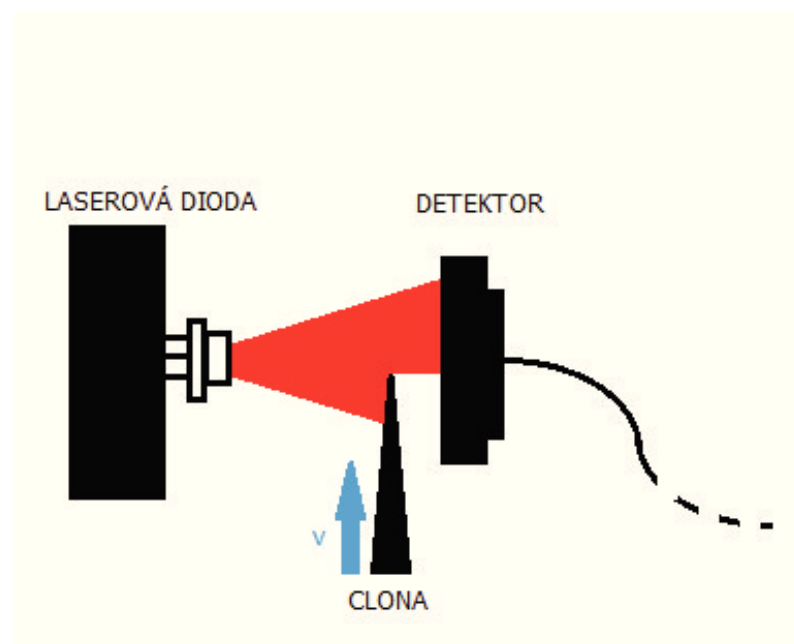
Při použití metody scanning pinhole (dírkou) nebo scanning slit (štěrbínou) se postupně prochází vyzářený svazek a odečítá se optický výkon, které prošel skrz štěrbinu, případně dírkou. V případě použití dírky získáme přímo výkony v jednotlivých bodech. U štěrbinu je potřeba jednotlivé body dopočítat, jelikož přes štěrbinu nám projde svazek celé šířky. Princip metody scanning slit můžeme vidět na obrázku 17, metody scanning pinhole na obrázku 18.

5.3 BeamMaster knife-edge

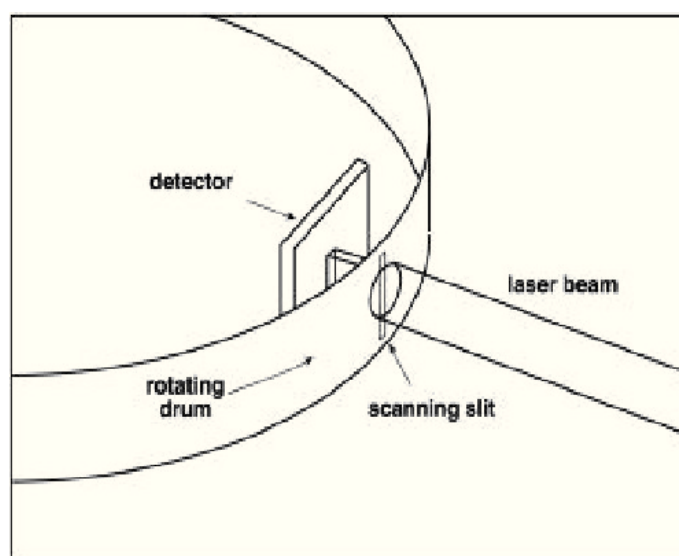
BeamMaster je produkt pro měření profilu optického svazku od firmy Coherent. Jedná se o jeden z nejpřesnějších systémů na trhu.

Vlastnosti BeamMastru:

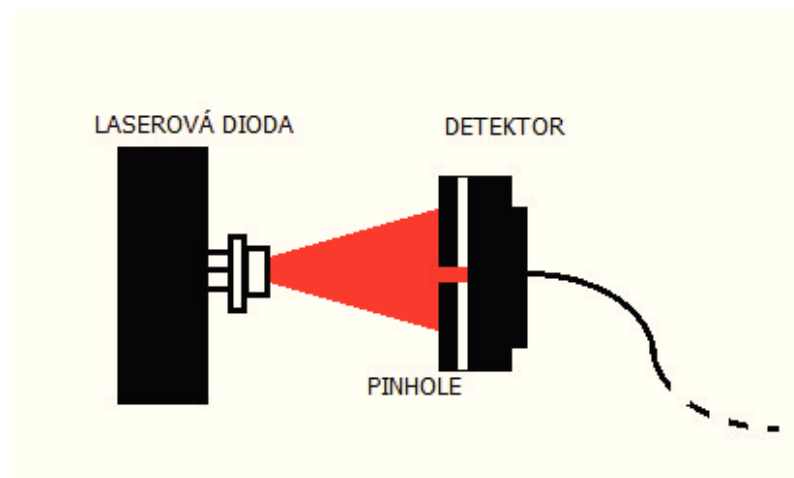
- měření tvaru laserového svazku a jeho výkonu



Obrázek 16: Princip metody knife-edge



Obrázek 17: Princip metody scanning slit [14]



Obrázek 18: Princip metody scanning pinhole

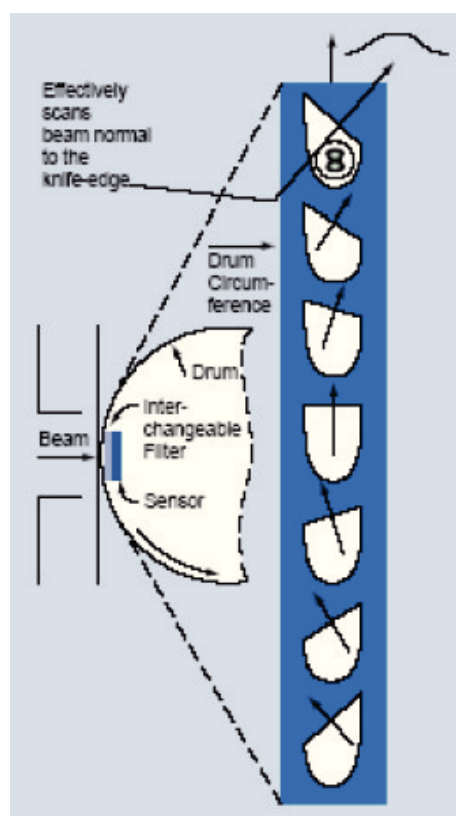
- umožňuje měřit optické svazky o velikostech od $3\ \mu\text{m}$ až po $9\ \text{mm}$ s rozlišením $0.1\ \mu\text{m}$ a vysokým dynamickým rozsahem
- real-time zobrazení naměřených dat v systému Windows v 2D nebo 3D pohledu
- pracuje s vlnovými délkami od $190\ \text{nm}$ po $1800\ \text{nm}$
- vstupní výkon může být menší než $10\ \mu\text{W}$ a s použitím filtru může mít až $1\ \text{W}$ při $400 - 1100\ \text{nm}$.

5.3.1 Multi knife-edge

Obvyklé systémy pro měření profilu optického svazku pracují ve dvou osách. Beam master umožňuje pracovat buď v třech nebo v sedmi osách. Beam master používá sedm samostatných hran pro skenování svazku v sedmi osách současně při jedné rotaci bubnu. To umožňuje přesnější měření tvaru a rozměrů optického svazku. Sedmiosý systém je také mnohem vhodnější pro měření eliptických optických svazků, kdy snáze nalezne hlavní a vedlejší osy svazku. Jednoduché schéma, jak vypadá systém multi knife-edge, je vidět na obrázku 20.



Obrázek 19: Produkt BeamMaster knife-edge [15]



Obrázek 20: Princip multi knife-edge [15]

6 CCD kamery

V této kapitole bude popsáno, jaké jsou možnosti měření optického svazku CCD kamerami.

6.1 Software

V případě měření optického svazku metodou knife-edge je sice výhodnější použít některý se specializovaných softwarů pro zpracování výsledků, ale není to nezbytné. Zatímco v případě použití CCD kamery jde o nutnost. CCD kamera musí být připojena k PC, na kterém je nainstalován speciální software.

V zásadě potřebujeme dva druhy programů. První software musí být schopen zachytit snímek z kamery a uložit ho ve formátu, který je vhodný k pozdějšímu zpracování. Tento software nemusí být nikterak specializovaný, existuje celá řada volně šiřitelných aplikací k tomu určených. Jako příklad můžeme uvést aplikaci AMCap. Většinou je však nějaký software k tomu určený dodáván samotným výrobcem dané CCD kamery. Posléze je potřeba použít program, který převede pořízený snímek na číselné hodnoty, představující optický výkon v jednotlivých bodech. Tentýž program, případně další specializovaný software, je potom schopen vykreslit tyto hodnoty v 3D grafu. Příkladem takového programu, který zvládne dvě zbývající úlohy najednou, je Matlab nebo Origin.

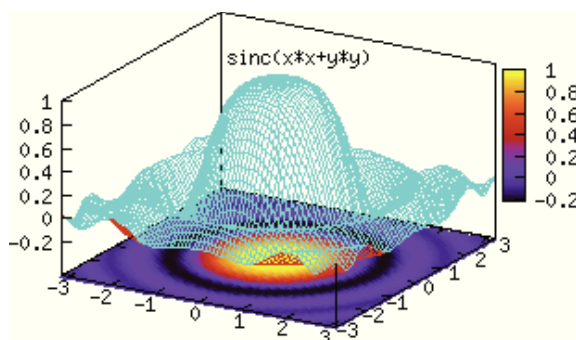
Existují však volně šiřitelné alternativy těchto aplikací. Příkladem takové aplikace pro zpracování obrazu, tedy převedení snímku na číselné hodnoty a následné vykreslení v podobě 3D grafu, je open-source projekt GNUPlot. Tato aplikace však není schopná zpracovat barevné snímky. Je tedy potřeba daný snímek zpracovat a převést na snímek obsahující pouze různé úrovně šedi. Tyto úkoly zvládne například rovněž open-source aplikace Image Magic. Příklad grafu vykresleného aplikací GNUPlot je vidět na obrázku 21.

6.2 Parametry CCD kamer

CCD kameru, kterou chceme použít pro měření profilu optického svazku, specifikuje několik základních parametrů.

6.2.1 Rozlišení

V prvé řadě je důležité rozlišení kamery. Většina kamer má rozlišení větší než 1024x768px. Pro relativně kvalitní zachycení svazku a jeho následné vykreslení nám však stačí rozlišení řádově 100x100px, což by teoreticky představovalo deset tisíc hodnot výkonu světla. Teoreticky proto, že většinou nejsme schopni měřeným svazkem pokrýt celou plochu CCD čipu. Důležité také je, jakou velikost má samotný pixel, to nám přesnost měření ovlivní více než samotné rozlišení. Kamery vyráběné například firmou Thorlabs mají velikosti pixelů od 4 do 10 μm .



Obrázek 21: Příklad grafu vytvořeného v GNUPlot [10]

6.2.2 Rozsah vlnových délek

Dalším parametrem je rozsah vlnových délek, které je schopna kamera zachytit. Obrázek 22 a 23 ukazuje graf závislosti citlivosti kamery na vlnové délce.

6.2.3 Výkonový rozsah

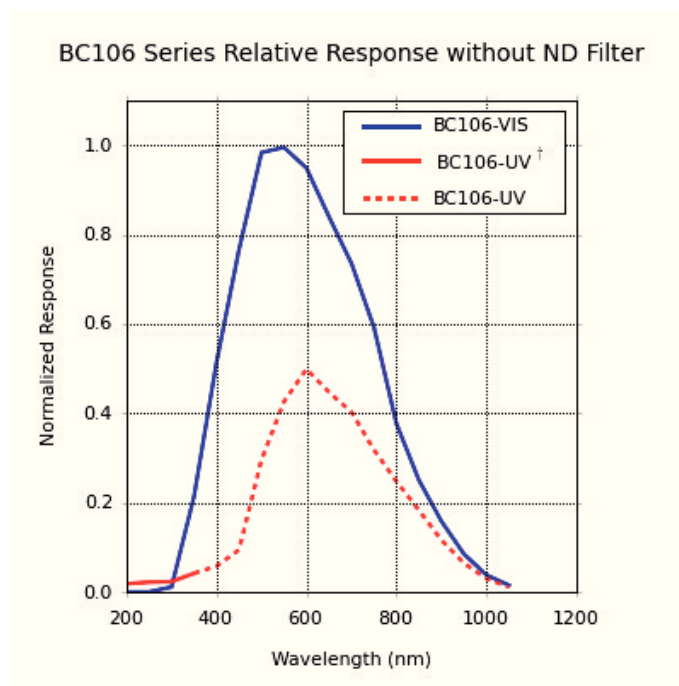
Tento parametr znamená, jak silným laserem můžeme do kamery posvítit, aby nedošlo k poškození čipu. Tento parametr silně závisí na tom, jak přesně je laserový svazek zaostřen, tedy jak velkou plochu čipu daný laser osvítí. Je totiž velký rozdíl, jestli veškerý výkon rozložíme po celé ploše čipu, tedy celková energie se nám rozloží mezi velké množství pixelů, nebo osvítíme plným výkonem jen pár pixelů. Například ve specifikaci kamery firmy Thorlabs najdeme graf, který nám tuto závislost popisuje. Příklad takového grafu je na obrázku 24. Řádově lze říci, že bez použití filtru nejsme schopni snímat laserový svazek o vyšším výkonu než 1W.

Pro snímání svazku o vyšším výkonu musíme použít přiměřeně silný filtr. Přiměřeně silný znamená najít kompromis, aby nedošlo k zničení čipu kamery, ale zároveň abychom svazek neutlumili až příliš. Problémem je, že i když použijeme vhodný filtr, vždycky dojde k utlumení části svazku.

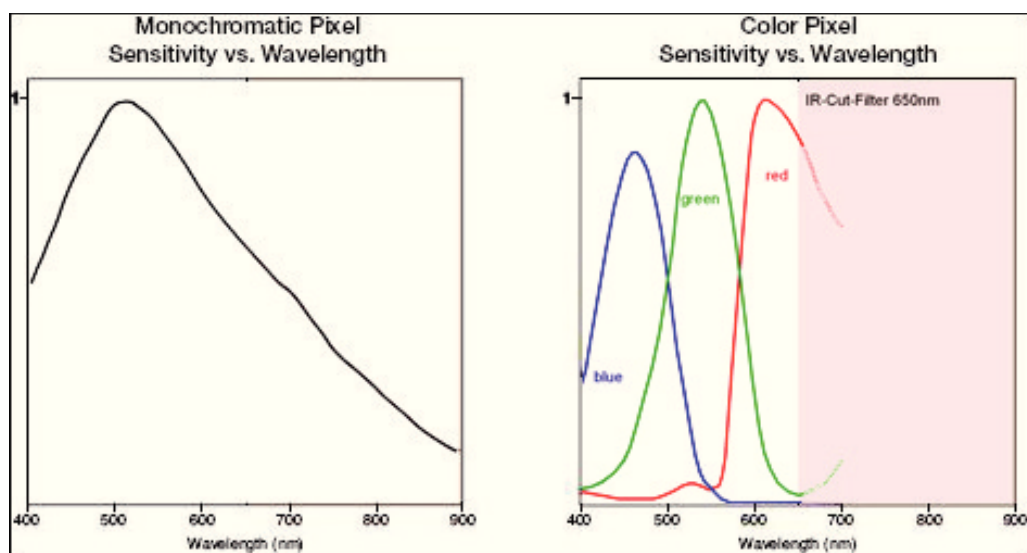
6.2.4 Další parametry

CCD kamery mají samozřejmě mnoho dalších parametrů, pro měření profilu optického svazku však nejsou až tak důležité. Zde je výčet některých z nich:

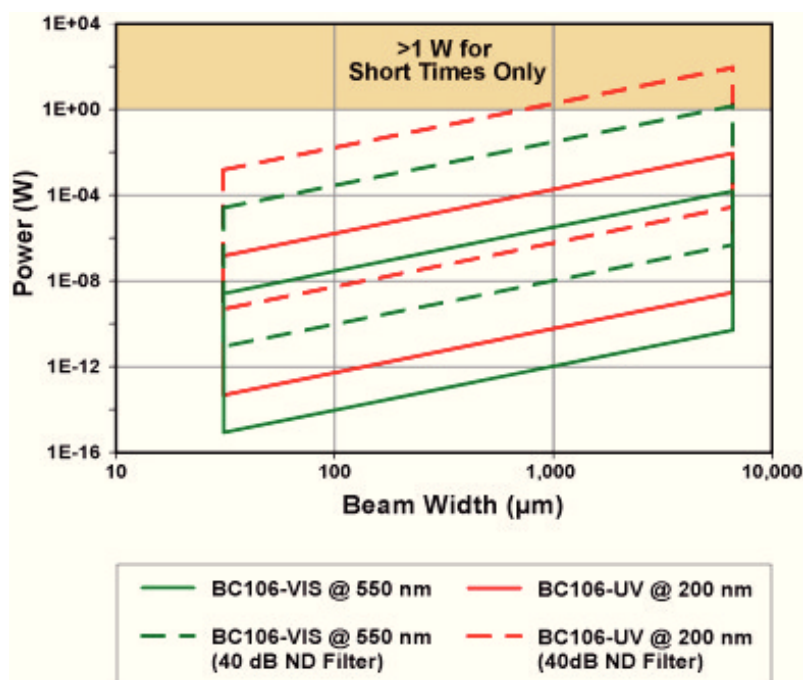
- velikost obrazového senzoru
- rychlost závěrky
- typ napájení
- způsob připojení k PC
- provozní teploty



Obrázek 22: Příklad grafu znázorňující citlivost kamery při různých λ [5]



Obrázek 23: Příklad grafu znázorňující citlivost pixelů kamery při různých λ [5]



Obrázek 24: Závislost výkonu na šířce svazku [5]

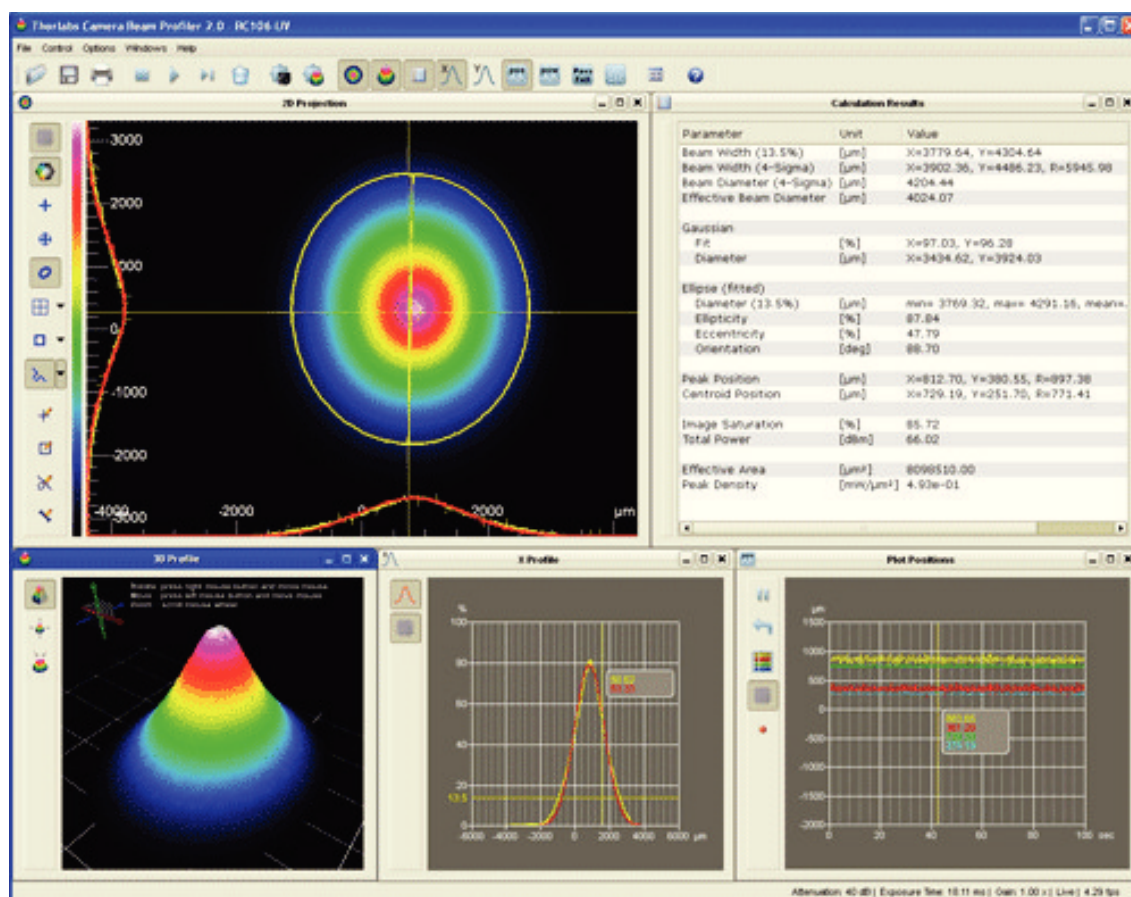
- atd.

6.3 Thorlabs CCD kamera Beam Profiler

Pro ukázkou kompletního systému CCD kamery pro měření profilu optického svazku jsem zvolil produkt od firmy Thorlabs (obrázek 25). Jak je na obrázku 25 vidět, součástí těla kamery jsou i filtry, které lze použít při potřebě měřit výkonnější lasery. Společně s kamerou je dodáván rovněž speciální software pro analýzu profilu optického svazku, ukáзка uživatelského interfacu je vidět na obrázku 26.



Obrázek 25: Thorlabs kamera pro měření optického svazku [5]



Obrázek 26: Uživatelský interface [5]

7 Realizovaná metoda scanning pinhole

Podstatou této metody je postupné proměření celého svazku tzv. pinholem. Pinhole je v podstatě malý otvor (díрка) kruhového tvaru. Celý svazek se postupně prochází bod po bodu podle předem stanoveného rastru a odečítají se hodnoty výkonu v jednotlivých bodech. Princip a schéma této metody je vidět na obrázku 27.

7.1 Pracoviště

Pro realizaci této metody bylo vytvořeno pracoviště, sestávající se z těchto prvků:

Seznam použitého softwaru:

- Thorlabs APT software
- Matlab

Seznam použitých zařízení:

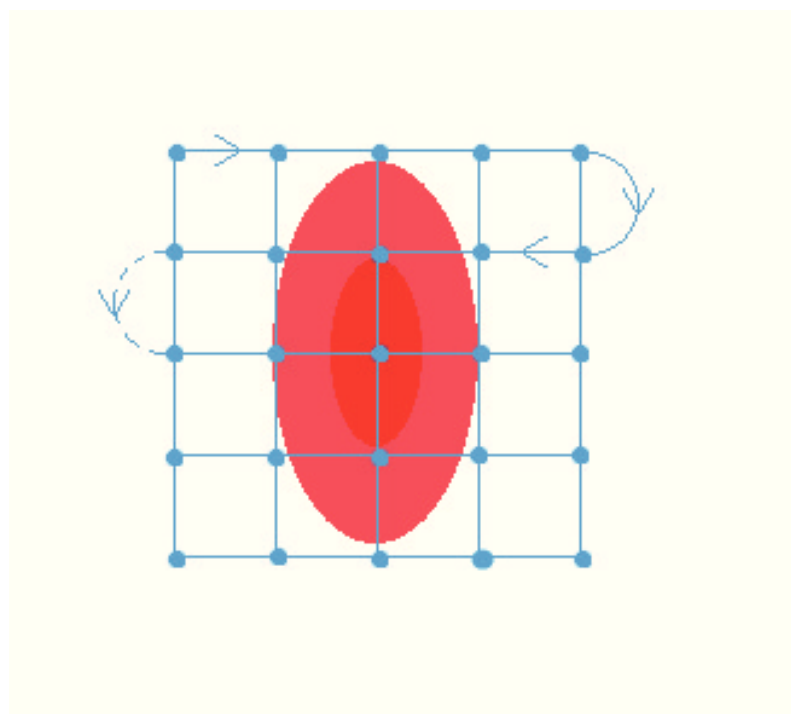
- osobní počítač
- ovladač motorků Thorlabs T-Cube DC Servo Motor Controller TDC001
- motorky Thorlabs DC Servo Motor Actuators with 12 mm Travel
- měřič optického výkonu Thorlabs PM100
- driver pro laserovou diodu Thorlabs Laser and Temperature Control System
- laboratorní stavebnice Thorlabs

Kompletně realizované pracoviště je vidět na obrázku 28. Na obrázku 29 je vidět způsob využití dvou elektrických motorků, každý z nich posouvá detektor po jedné ose. Byl také použit jeden mechanický motorek pro hrubší nastavení počáteční pozice detektoru v ose X.

7.1.1 Pinhole

Jak již bylo napsáno, pinhole je v podstatě malý otvor kruhového tvaru. Velikost tohoto otvoru může být různá. Thorlabs nabízí pinholy, např. o velikostech $5\mu\text{m}$ nebo $10\mu\text{m}$. V našem případě byli použity dvě velikosti otvorů. Menší, $10\mu\text{m}$, od firmy Thorlabs a větší, který bylo třeba vyrobit o velikosti 0,5 mm. Volba velikosti otvoru závisí na požadované přesnosti vykreslení profilu optického svazku.

Jelikož plocha samotného snímače optického výkonu je příliš velká, bylo potřeba před něj připevnit zmíněný pinhole určité velikosti a tím docílit měření výkonu jen v konkrétním bodě. Použité pinholy a způsob jejich uchycení a použití je vidět na obrázku 30.



Obrázek 27: Princip metody pinhole

7.1.2 Motorky - Z812 a ovladače motorků T-Cube TDC001

Aby bylo možné zautomatizovat metodu scanning pinhole, bylo potřeba použít dva posuvné elektrické motorky, které je možné ovládat pomocí počítače. Každý motorek ovládá posuv v jedné ose. Zvolil jsem motorky firmy Thorlabs Z812. Ke každému motoru patří jeden ovladač rovněž od firmy Thorlabs TDC001. Motorky jsou k ovladačům připojeny pomocí RS232 a ovladače k počítači pomocí USB konektoru. Softwarově potom ovladače s PC komunikují pomocí frameworku ActiveX. Pohled na motorky a jejich konektory je vidět na obrázku 31.

7.1.3 Měřič optického výkonu Thorlabs PM100

Pro měření optického výkonu byl zvolen měřič Thorlabs PM100. V současné době se tento měřič už nenachází v nabídce firmy Thorlabs. Nicméně jeho funkce jsou pro potřeby této práce zcela dostačující. Přístroj lze připojit k PC pomocí sériové linky (RS232). Skrze sériovou linku lze poté pomocí speciálních příkazů kompletně ovládat všechny funkce tohoto měřiče. Tento měřič je vidět na obrázku 28.



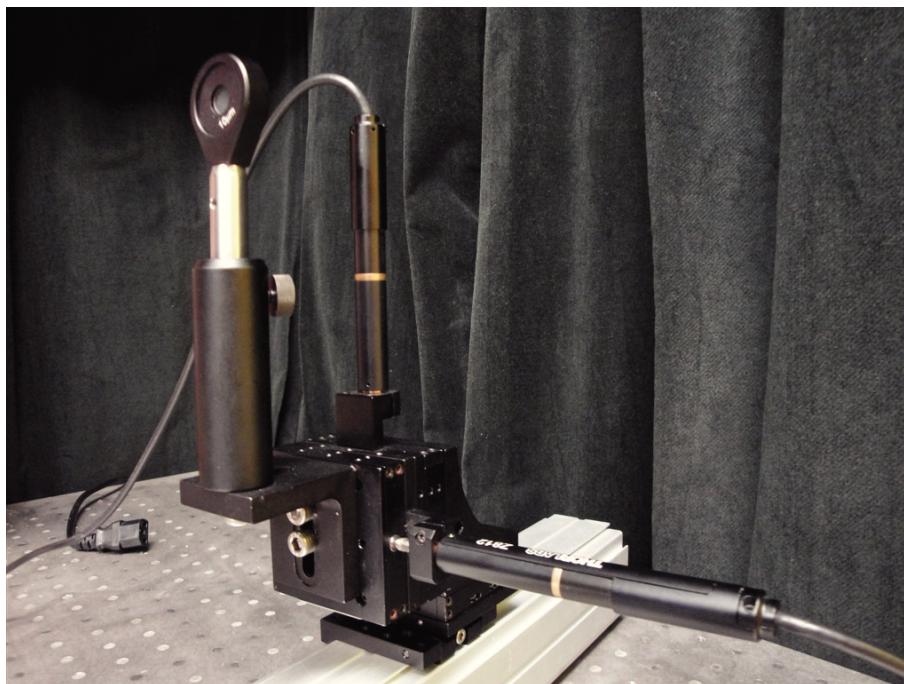
Obrázek 28: Pracoviště metody pinhole

7.1.4 Driver pro laserovou diodu

V rámci experimentálního měření byly proměřovány profily dvou typů laserů. Lasery, jejichž součástí byla rovněž zaostřovací optika a samostatné laserové diody. V případě měření samotné diody bylo využito setu od firmy Thorlabs Laser and Temperature Control System. Toto zařízení umožnilo připojení jakékoliv laserové diody a následné přesné měření jejího profilu. Hlavní vlastností tohoto produktu je, že umožňuje nejen přesné nastavení pracovního bodu pomocí velikosti proudu, ale rovněž umožňuje udržovat pracovní teplotu na konstantní hodnotě. Toto bylo zvláště důležité při přesnějších měřeních, kdy délka měření dosahovala až dvou hodin. Při takto dlouhém měření by pravděpodobně došlo ke zvýšení teploty diody a následné deformaci profilu optického svazku. Modul pro připojení diody a její ovladače jsou na obrázku 32.

7.2 Software

Pro automatizaci měření bylo potřeba nalézt vhodné softwarové řešení, které by umožnilo současnou komunikaci s veškerými přístroji a zároveň následné vyhodnocení naměřených hodnot. Nejlépe těmto účelům vyhovovala aplikace Matlab. Bylo potřeba napsat skript, tzv. M-file, který zautomatizuje celé měření.



Obrázek 29: Využití dvou elektrických motorků

7.2.1 Motorky - Z812 a ovladače motorků T-Cube TDC001

Motorky se k počítači připojují skrze jejich ovladače, tzv. kostky (T-Cube). Kostky jsou potom připojeny k počítači pomocí USB konektorů, což znamená, že ovládání motorků pomocí počítače není zcela triviální. Proto pro pochopení možností ovládání motorků pomocí počítače bylo nejprve použito nativní softwarové řešení dodávané společně s motorky. Toto řešení se skládá ze dvou samostatných aplikací, APT Config a APT User.

APT Config je aplikace, která slouží k nastavení na pozadí běžícího serveru. Přes tento server běží veškerá komunikace s motorky. To mimo jiné znamená, že bez instalace této aplikace, tedy i samotného serveru, nelze k motorkům vůbec přistupovat. Nejdůležitější věcí, kterou je potřeba v konfiguraci serveru udělat, je spárovat motorky z jejich ovladačů (kostkami). Tato operace je vidět na obrázku 33. Aplikace mimo jiné umožňuje nastavit simulační mód, kdy server pouze virtuálně komunikuje s motorky, aniž by byly motorky fyzicky připojeny. Toto je zvláště vhodné pro počáteční testování.

APT User je uživatelské ActiveX rozhraní, které umožňuje přímé ovládání motorků, nastavení parametrů motorků a případně jednoduché zadání sekvence prováděných příkazů. Toto je vidět na obrázku 34. Pro potřeby automatizace našeho měření je však toto rozhraní téměř nepoužitelné.

Naštěstí v aplikaci Matlab existuje možnost vytvoření a ovládání totožné ActiveX aplikace. Ovšem samotné zobrazení totožného panelu jako v aplikaci APT User nic neřeší. Bylo potřeba napsat skript, který by byl schopný komunikovat s motorky přímo. Řešením bylo vyvolání daného ActiveX prvku(panelu), avšak zamezit jeho zobrazení. Poté bylo



Obrázek 30: 10 μ m pinhole

možno volat skrze tento prvek jednotlivé metody stejně, jako bychom mačkali tlačítka na panelu aplikace APT User. Výpis 1 ukazuje vytvoření, ale nezobrazení ovládacího prvku ActiveX. Výpis 2 je příklad volání metody pro posuv motorku na absolutní pozici.

```
motor1 = actxcontrol('MGMOTOR.MGMotorCtrl.1',[0,0,0,0],0);
```

Výpis 1: Vytvoření ActiveX prvku

```
motor1.MoveAbs(0,1);
```

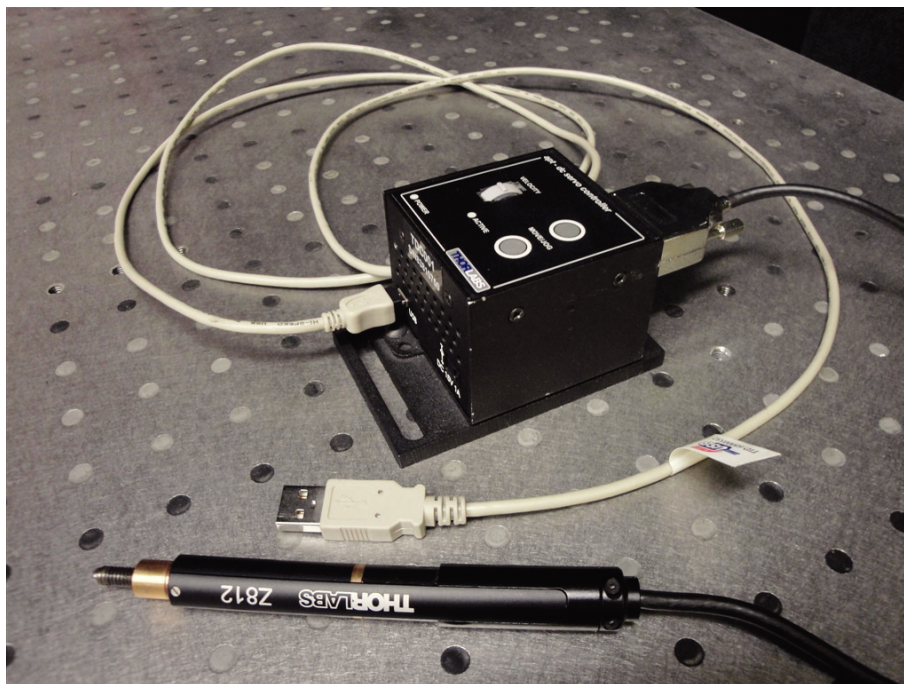
Výpis 2: Ukázka volání metody

7.2.2 Měřič optického výkonu Thorlabs PM100

V případě ovládání měřiče PM100 byla situace nepatrně jednodušší. Tento měřič se totiž ovládá pomocí standardní sériové linky. A jelikož samotný program Matlab je psaný v jazyce C, tak ovládání sériové linky je v něm nativně implementováno. Nebylo tedy potřeba instalovat speciální aplikaci pro přístup k měřiči. Výpis 3 ukazuje jak aktivovat komunikaci s měřičem.

```
s = serial('COM2','BaudRate',115200,'StopBits',1,'Parity','none','Terminator','LF','FlowControl','hardware');
```

Výpis 3: Vytvoření komunikace přes sériovou linku



Obrázek 31: Motorek Z812 a jeho ovladač T-Cube TDC001

Pro sledování komunikace na sériové lince byla použita aplikace Free Serial Port Monitor. Sledování komunikace je důležité hlavně proto, že nevíme, na kterém COM portu je měřič připojen. Z výpisu 3 je zřejmé, že již při zahájení komunikace je potřeba zadat správné číslo COM portu. V případě připojení měřiče k standardnímu serial konektoru je číslo portu při každém zapnutí počítače stejné. Problém nastává ve chvíli, kdy použijeme např. USB hub a redukci na serial-port, případně serial-port hub. V těchto případech se číslo COM portu při každém zapnutí počítače, či odpojení a zapojení měřiče, změní. Před zahájením měření je potom potřeba právě pomocí zmíněné aplikace zjistit, na kterém COM portu komunikace probíhá.

7.2.3 Uživatelské rozhraní

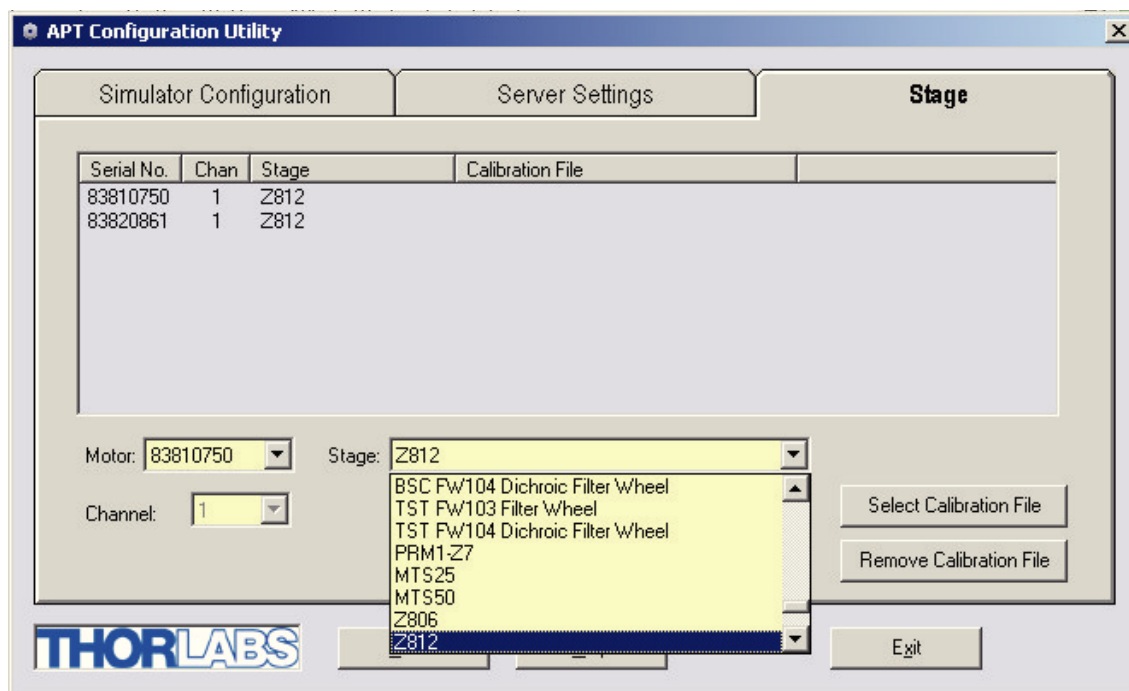
Jelikož používání psaného kódu pro ovládání měření by bylo nepohodlné, bylo vhodné vytvořit uživatelské rozhraní. Jeho podoba je zachycena na obrázku 35. Uživatelské rozhraní je navrženo tak, aby co nejvíce eliminovalo chyby uživatele a zároveň uživatele postupně vedlo při nastavování jednotlivých parametrů měření.



Obrázek 32: Driver pro laserovou diodu

7.2.4 Cyklus pro ovládání motorků

Obeční princip cyklů pro posuv motorků je následující: První cyklus posouvá detektor po ose Y a druhý po ose X. Původní cyklus pro ovládání motorků, výpis kódu číslo 4, byl navržen tak, že po proměření jednoho řádku se detektor vždy vrací na začátek dalšího řádku a pokračuje v měření ve stejném směru jako v případě řádku předchozího. Toto řešení se však ukázalo jako nevhodné ze dvou důvodů. Tím hlavním byl problém, že motorky se nebyly schopny vracet na stanovenou pozici. Konkrétně to znamená, že pokud byl motorkům poslán příkaz "posuň se na pozici 1mm", tak v případě posuvu na tuto pozici z pozice 0mm se motorky skutečně zastavily na vzdálenosti 1mm. Pokud se však motorky vracely na danou pozici z krajní polohy, tedy konce řádku, vždy tuto pozici 1mm nepatrně přejely. To způsobovalo velké nepřesnosti v měření. Bylo tedy nutné motorky vždy vracet do pozice 0mm a poté až na začátek řádku, tedy na pozici 1mm. S tím také souvisí druhý problém a to zbytečná časová náročnost měření. Jelikož neustálé vracení motorků na začátek řádku a také neustálé nastavování počáteční pozice



Obrázek 33: GUI aplikace APT Config

ce způsobovalo značné časové prodlevy. Důvodem, proč motorky vždy musely začínat, či se vracet na pozici 1mm bylo, že aby vůbec došlo k pohybu detektoru optického výkonu připevněného k posuvné destičce, musely být motorky vysunuté minimálně jeden milimetr.

```

for i=1:steps_y
    for j=1:steps_x
        fprintf(handles.s,':POWER?');
        matrix(j,(steps_y + 1 - i)) = str2num(fscanf(handles.s));
        handles.motor1.MoveRelative(0,1);
        pause(0.5);
    end
    handles.motor1.SetAbsMovePos(0,0);
    handles.motor1.MoveAbsolute(0,1);
    handles.motor2.MoveRelative(0,1);
    handles.motor1.SetAbsMovePos(0,1);
    handles.motor1.MoveAbsolute(0,1);
end

```

Výpis 4: Původní cyklus pro pohyb motorků

Pro odstranění výše zmíněných problémů byl napsán cyklus, který posouvá detektorem kontinuálně. To znamená, že se po skončení skenování jednoho řádku nevrací na začátek dalšího řádku, ale jen se posune o řádek níže a pokračuje ve skenování v opačném



Obrázek 34: GUI aplikace APT User

směru. Toto jednak zkrátilo čas měření a také odstranilo problém s polohováním motorků na začátek řádku. Tento cyklus je vidět ve výpisu 5.

```

for i=1:steps
    for j=1:steps
        if (direction == 0)
            if (j==1)
                fprintf(handles.s,':POWER?');
                matrix((steps + 1 - i),1) = str2num(fscanf(handles.s));
            else
                pause(0.5);
                handles.motor1.SetAbsMovePos(0,((j-1)*step_size)+1);
                handles.motor1.MoveAbsolute(0,1);
                fprintf(handles.s,':POWER?');
                matrix((steps + 1 - i),j) = str2num(fscanf(handles.s));
            end
        else
            if (j==1)
                fprintf(handles.s,':POWER?');
                matrix((steps + 1 - i),steps) = str2num(fscanf(handles.s));
            end
        end
    end
end

```

```

        else
            handles.motor1.SetAbsMovePos(0,((step_size*(steps-1)+1) - ((j-1)*step_size)));
            handles.motor1.MoveAbsolute(0,1);
            fprintf(handles.s,' :POWER?');
            matrix((steps + 1 - i),(steps + 1 - j)) = str2num(fscanf(handles.s));
        end
    end
end
if(direction==1)
    direction = 0;
else
    direction = 1;
end

handles.motor2.MoveRelative(0,1);

end

```

Výpis 5: Finální použitý cyklus pro ovládání motorků

7.3 Experimentální měření

Pomocí metody scanning pinhole byla provedena měření profilů dvou typů laserů.

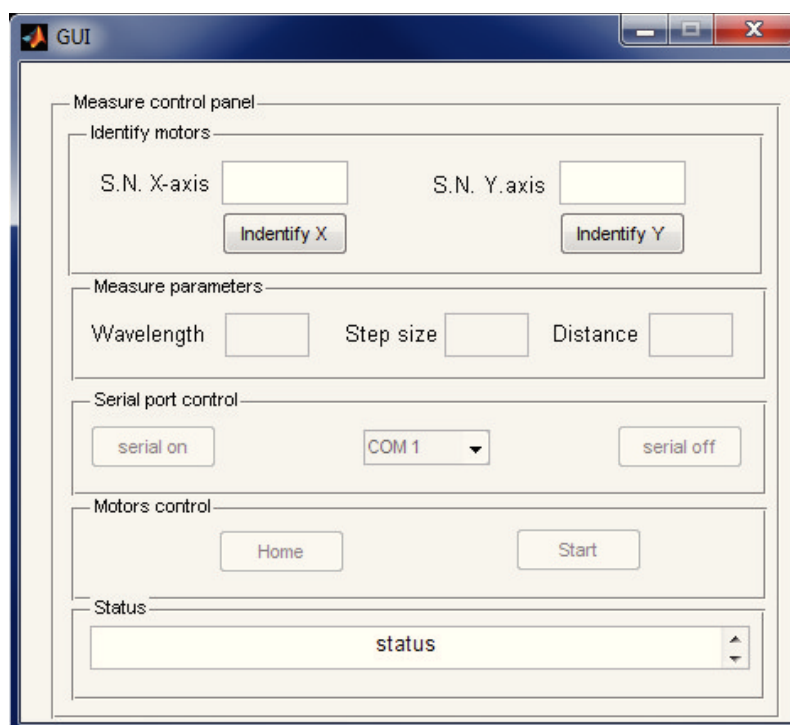
7.3.1 Samostatné laserové diody

V prvním případě se za pomoci driveru pro laserovou diodu, popsaného v kapitole 7.1.4, změřily profily dvou samostatných diod:

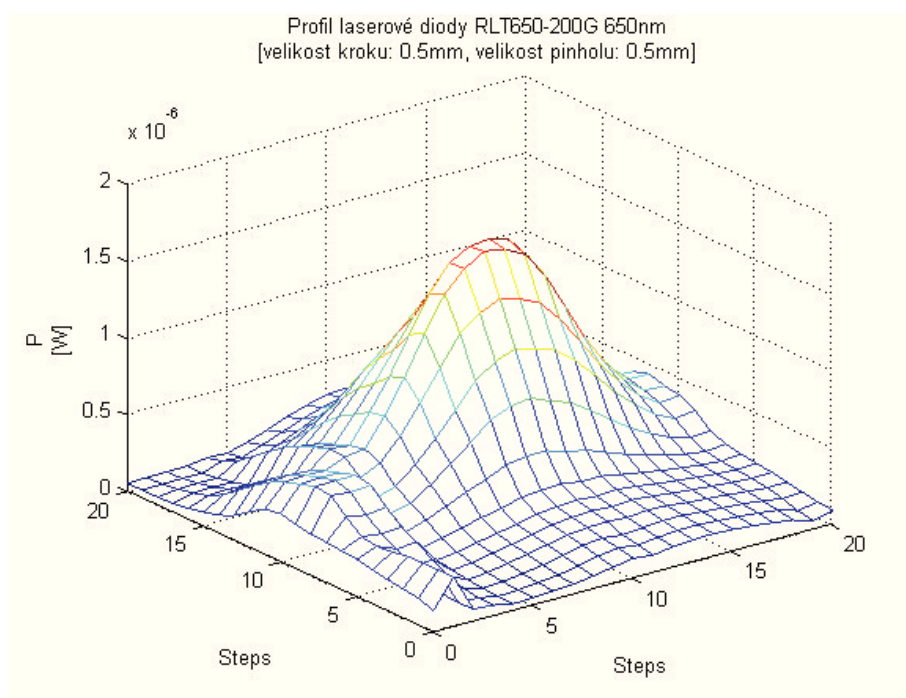
- laserová dioda RLT650-200G - Obrázek 36.
- laserová dioda ADL-650TA2 - Obrázek 37.

7.3.2 Laser MELLES GRIOT 25-LHP-151-230

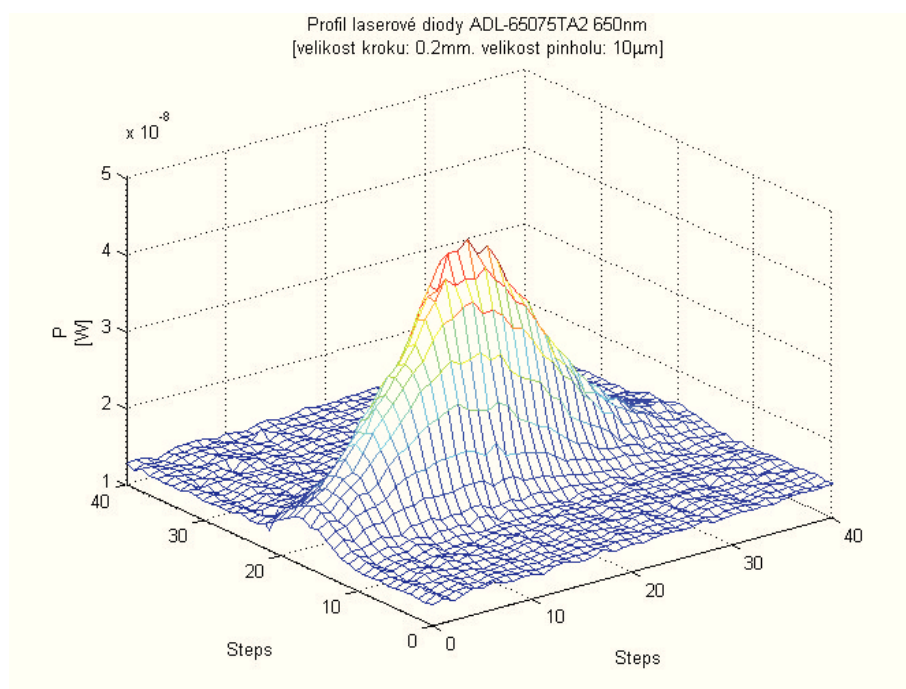
V druhém případě se provedlo měření profilu MELLES GRIOT 25-LHP-151-230 laseru. Součástí těla tohoto laseru byla rovněž zaostřovací optika, výstupní optický svazek byl tedy kvalitně zkolimován a nevykazoval téměř žádnou divergenci. Profil tohoto laseru je na obrázku 38.



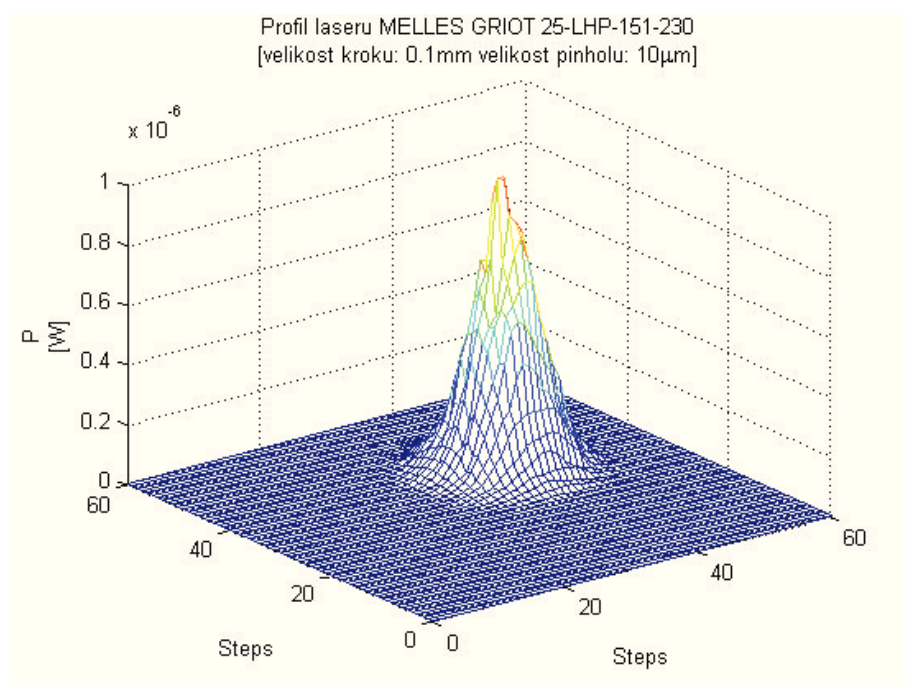
Obrázek 35: GUI aplikace pro měření metodou pinhole



Obrázek 36: Změřený profil laserové diody RLT650-200G



Obrázek 37: Změřený profil laserové diody ADL-65075TA2



Obrázek 38: Změřený profil laseru MELLES GRIOT 25-LHP-151-230

8 Realizovaná metoda CCD kamera

Další realizovanou metodou bylo měření profilu pomocí CCD kamery. Princip měření spočívá v pořízení snímku svítícího laseru, uložení snímku jako matice hodnot a následné vygenerování 3D grafu. Jak bylo popsáno v kapitole 6.2.3, problém této metody spočívá v nebezpečí spálení CCD snímače. Pro měření byla proto použita sada filtrů od firmy Thorlabs.

8.1 Pracoviště

Jelikož použitá kamera pochází od firmy Basler a filtry od firmy Thorlabs, nebylo možno připevnit filtry přímo na kameru. Proto pro realizaci měření pomocí CCD kamery bylo potřeba vytvořit přípravek, který umožnil současné připevnění kamery a stínících filtrů. Tato měřicí sestava je vidět na obrázku 39.

Seznam použitých zařízení:

- kamera Basler A631f
- sada filtrů Thorlabs neutral density filter kit
- přípravek pro měření
- osobní počítač

Seznam použitého softwaru:

- software pro kameru - National Instruments Measurement & Automation Explorer
- Matlab

8.1.1 CCD kamera Basler A631f

Pro toto měření byla použita jediná dostupná CCD kamera v laboratoři a to Basler A631f. Technické parametry kamery jsou v tabulce 2.

8.1.2 Sada filtrů Thorlabs neutral density filter kit

Při měření silných laserů je potřeba využít stínící filtry, aby nedošlo k zničení CCD čipu kamery. Použitou sadu filtrů od firmy Thorlabs je vidět na obrázku 40. Jednotlivé filtry jsou označeny ND číslem. Toto číslo udává hustotu daného filtru, jinak řečeno, jeho propustnost. Význam tohoto čísla a závislost propustnosti na vlnové délce popisuje graf na obrázku 41.

Při samotném pořizování snímků se ukázalo, že filtry jsou nutné nejen pro ochranu CCD čipu před zničením, ale rovněž pro zabránění saturace čipu. Toto názorně ukazuje obrázek 42. Při pořizování snímku vlevo byl použit slabší filtr s indexem ND 3,8. Je zřetelně vidět, že uprostřed svazku, kde je energie největší, došlo k přesaturování CCD čipu, což mělo za následek vykreslení grafu s plochou špičkou. Obrázek vpravo ukazuje



Obrázek 39: Přípravek pro měření CCD kamerou

použití jen o jeden stupeň silnějšího filtru. Je vidět, že graf má reálnější tvar profilu optického svazku. Je ovšem také vidět, že při použití silnějšího filtru sice vidíme lépe vykreslenou špičku profilu, ale zároveň došlo k většímu utlumení krajních struktur.

8.2 Software

Jelikož byla použita kamera od firmy Basler, nebylo možné metodu zcela zautomatizovat pomocí aplikace Matlab. Tato kamera, na rozdíl např. od motorků firmy Thorlabs, nemá podporu přímo v Matlabu. Bylo potřeba použít samostatný software pro pořízení snímku. Software, který byl použit, pochází z dílny National Instruments. Uživatelské rozhraní této aplikace ukazuje obrázek 43.

Zpracování snímku, tedy převedení snímku na matici hodnot a vykreslení 3D grafu, již bylo realizováno pomocí skriptu v Matlabu. Výpis 6 ukazuje jakými metodami je tato operace realizována.

```
I=imread('treti.png');
I=im2double(I);
```

Výpis 6: Uložení snímku jako matice hodnot typu double

Metoda `imread` načte obrázek do proměnné `I`. Metoda `im2double` poté převede obrázek na matici hodnot, kde každý bod je vyjádřen číslem typu `double` v rozsahu 0-1. Nula znamená černou, jednička potom bílou. Vykreslení 3D grafu je již potom snadné.

Výrobce	Basler
Model	A631f
Čip	Sony ICX267AL
Typ čipu	CCD
Maximální rozlišení	1392 x 1040px
Šířka pixelu	4,65 μ m
Výška pixelu	4,65 μ m
Maximální fps	18,7fps
Typ rozhraní	Firewire 1394a

Tabulka 2: Parametry kamery

Pro zjednodušení práce se skriptem převádějící matici na 3D graf bylo vytvořeno jednoduché uživatelské rozhraní. Pomocí tohoto rozhraní se načte snímek a aplikace automaticky vykreslí 3D graf profilu optického svazku.

8.3 Experimentální měření

V případě této metody bylo provedeno měření pouze laseru MELLES GRIOT 25-LHP-151-230. Důvodem bylo, že optické svazky samostatných diod byly silně divergentní. CCD čip použité kamery má rozměry přibližně 6x6mm. Abychom osvětili laserovou diodou pouze CCD čip, znamenalo by to měřit profil ve vzdálenosti menší než 0.5mm. To však znemožnilo již tělo samotné kamery, a při použití byt jen jednoho filtru se nám kamera od měřené diody dokonce vzdálila zhruba na vzdálenost jednoho centimetru.

8.3.1 Laser MELLES GRIOT 25-LHP-151-230

Jak bylo napsáno v kapitole 6.2.3, k zničení čipu CCD kamery by nemělo dojít v případě, že se měří lasery do výkonu 1W. Námi měřený laser MELLES GRIOT 25-LHP-151-230 by měl mít výkon 15mW, jak však ukázalo měření pomocí měřiče PM100 (7.1.3), reálný optický výkon se pohybuje kolem 6mW. To znamená, že tento laser by měl jít pomocí CCD kamery teoreticky měřit bez použití jakéhokoliv filtru.

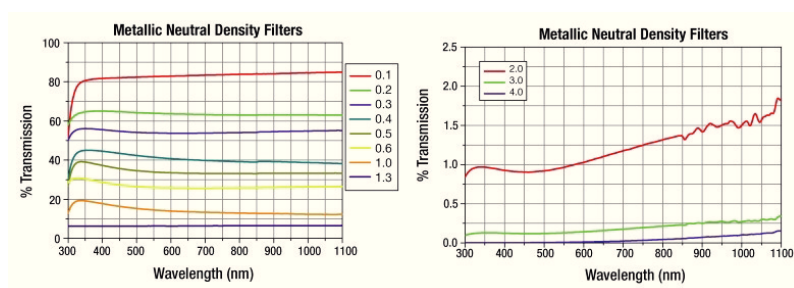
Pro jistotu byl však před kameru umístěn filtr ze sady filtrů Thorlabs (8.1.2) s indexem ND3. Ukázalo se, že sice nedošlo k poškození CCD čipu, ale čip byl i přes použití filtru silně přesaturován. Podoba grafu z takto pořízeného snímku je na obrázku 44. Je zřetelné, že takový graf nemá téměř žádnou vypovídající hodnotu. Následujícím krokem bylo postupné zesilování filtru až do chvíle, kdy již nebyla saturace zřetelná.

Jelikož známe rozměry pixelů, můžeme z grafu také přibližně odečíst rozměry daného svazku.

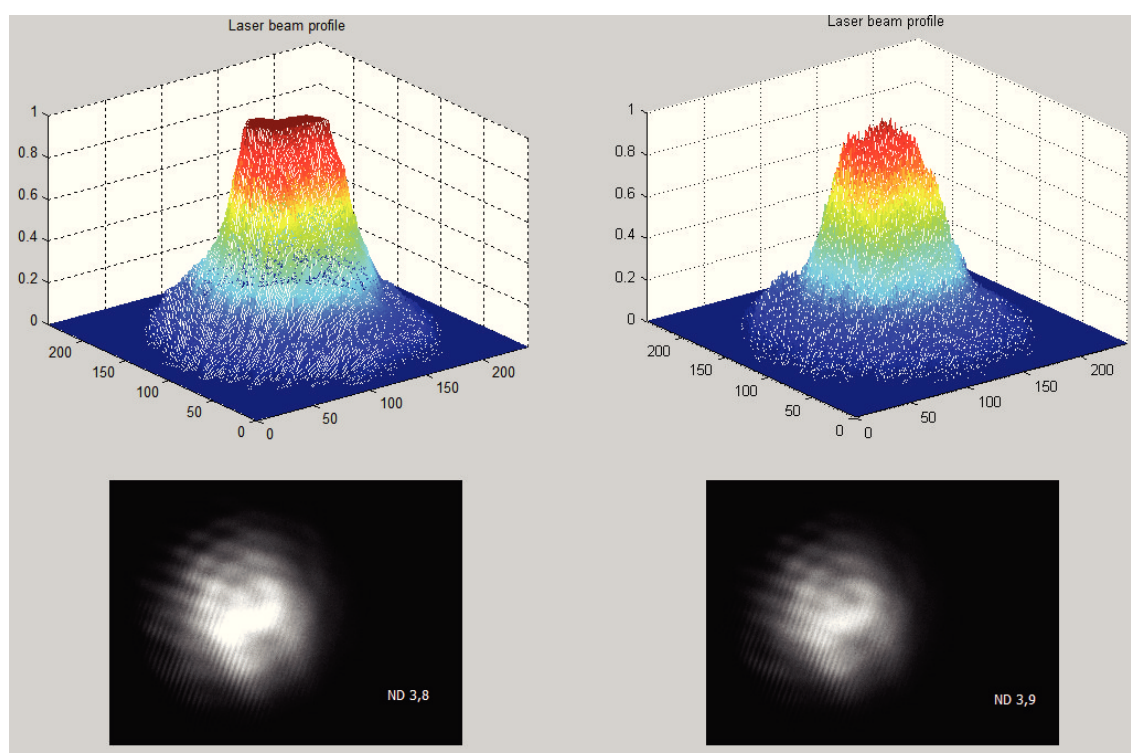
Výsledná podoba grafu profilu optického svazku vytvořeného touto metodou je na obrázku 45.



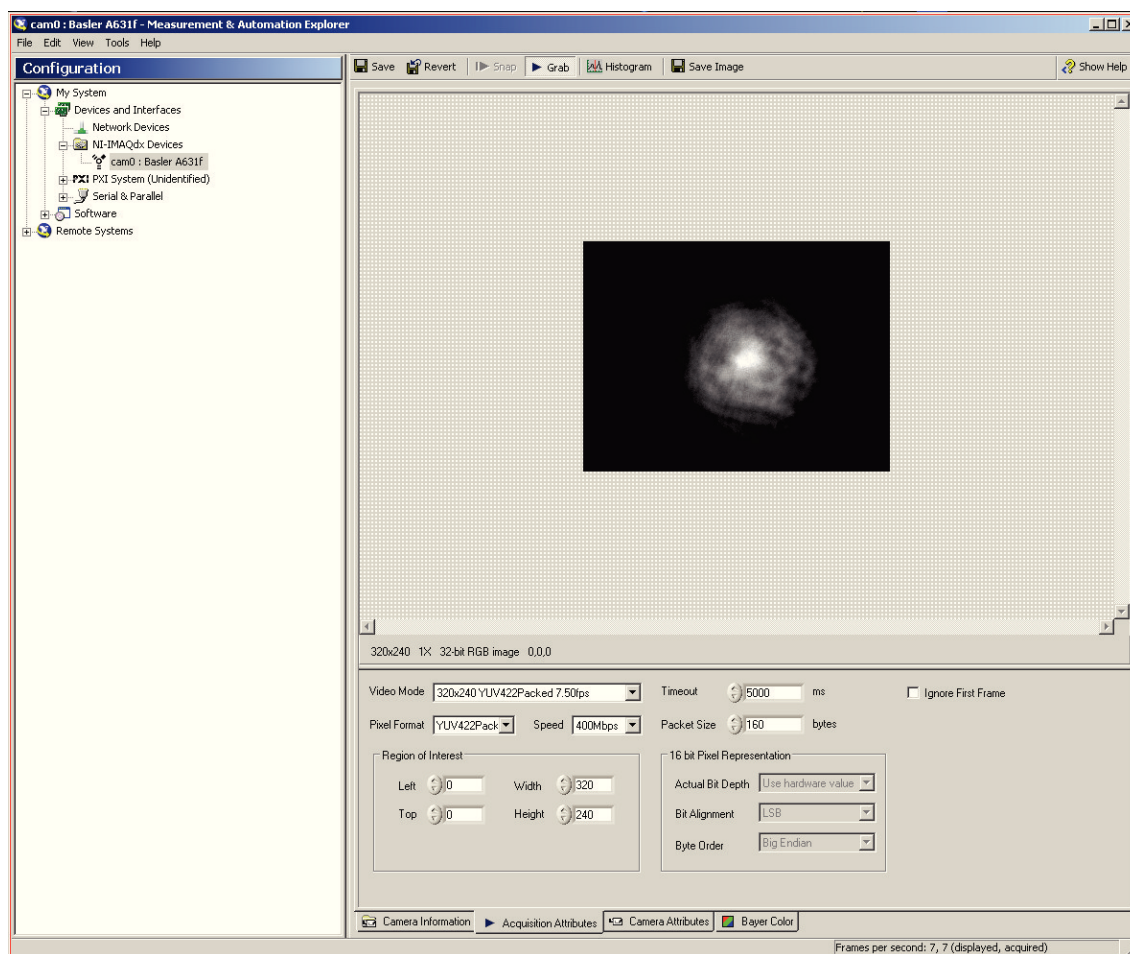
Obrázek 40: Sada filtrů



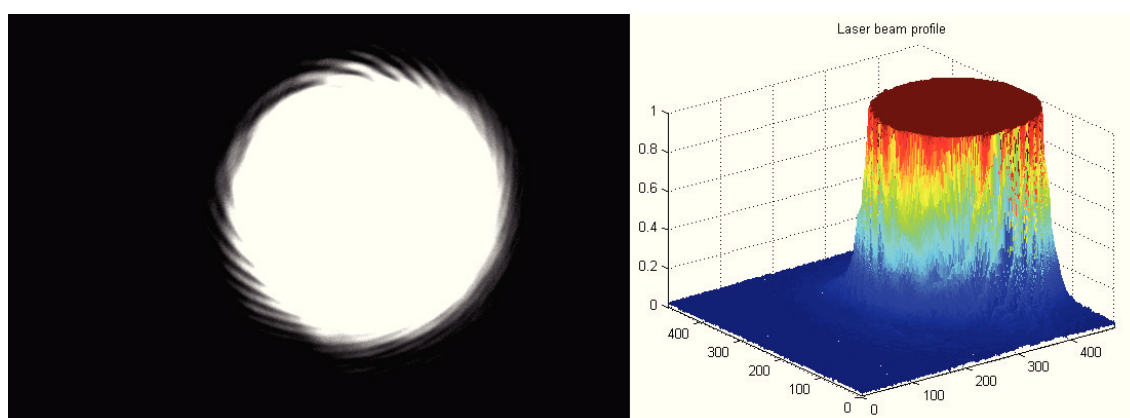
Obrázek 41: Význam čísla ND a závislost propustnosti na vlnové délce [6]



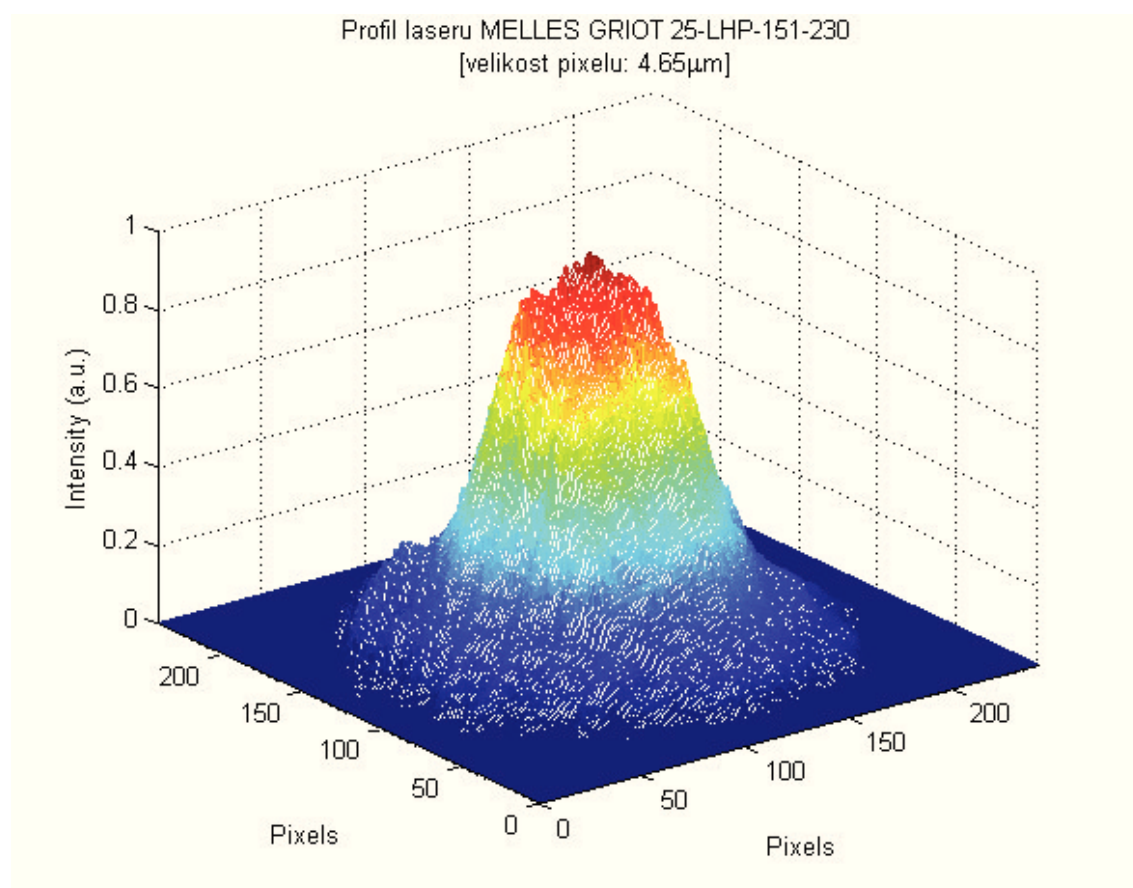
Obrázek 42: Vliv filtru na kvalitu grafu



Obrázek 43: GUI aplikace pro ovládání kamery



Obrázek 44: Graf při přesaturování CCD čipu



Obrázek 45: Profilu laseru MELLES GRIOT 25-LHP-151-230 získaný pomocí CCD kamery

9 Realizovaná metoda knife-edge

U této metody je důležitý správný postup měření a hlavně správný postup při zpracování naměřených hodnot. Naměřené hodnoty se zde nedají přímo vykreslit jako profil svazku v podobě grafu, ale musí se předtím matematicky zpracovat. Tento postup bude vysvětlen níže.

9.1 Pracoviště

Pro tuto metodu bylo využito již sestavené pracoviště z metody scanning pinhole. Bylo jej potřeba jen mírně modifikovat. Na místo detektoru optického výkonu byla připevněna clona (hrana nože) a detektor se fixně připevnil tak, aby se nehýbal společně se clonou a byl stále v ose s měřeným laserem.

Pro získání představy o profilu optického svazku je potřeba svazek proměřit minimálně ve dvou osách. Použité pracoviště z metody scanning pinhole by bylo velice komplikované uzpůsobit tak, aby automaticky provedlo měření ve více osách. Řešením se ukázalo, že se složitě nemusí otáčet celé zařízení pro posuv clony, ale pro měření ve více osách se pootočí samotný laser.

9.2 Software

Pro ovládání clony byl využit pouze motorek, který v metodě scanning pinhole posouval detektor po ose Y. V souvislosti s tím byla modifikována aplikace a cyklus pro ovládání motorku. Uživatelské rozhraní je vidět na obrázku 46. Výpis 7 ukazuje modifikovaný cyklus pro posuv motorku. Je vidět, že v tomto případě se jedná pouze o jednoduchý cyklus, který posouvá motorek v jednom směru.

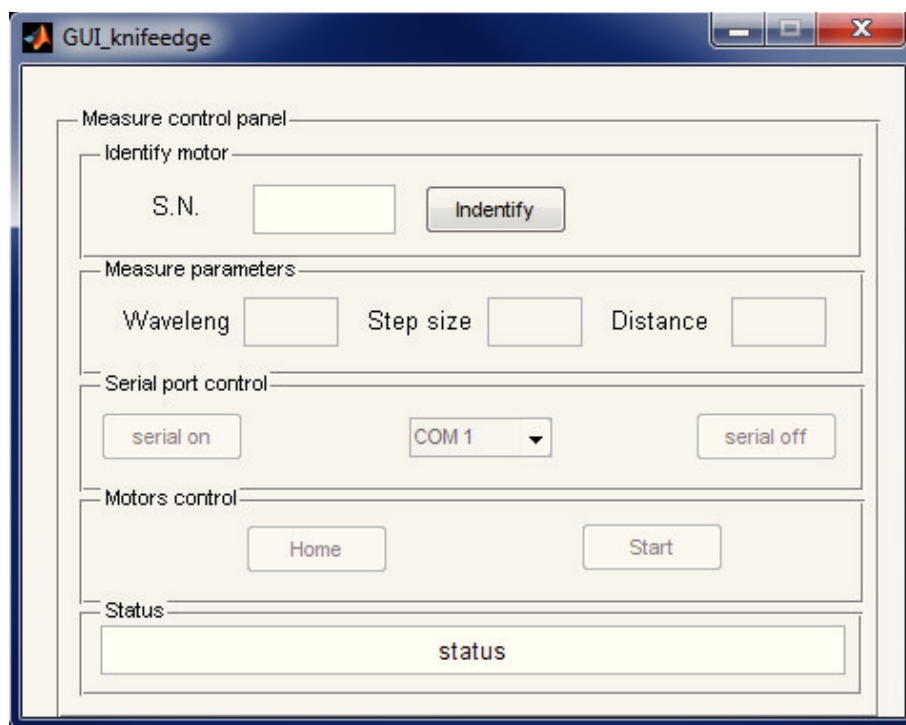
```
for i=1:steps
    fprintf(handles.s,':POWER?');
    matrix(i) = str2num(fscanf(handles.s));
    pause(0.5);
    handles.motor1.SetAbsMovePos(0,((i-1)*step_size)+1);
    handles.motor1.MoveAbsolute(0,1);
end
```

Výpis 7: Cyklus pro ovládání motorku u metody knife-edge

Pro pozdější zpracování naměřených hodnot aplikace ukládá naměřené hodnoty do samostatného textového souboru.

9.2.1 Zpracování naměřených dat - Matlab

Pokud vykreslíme graf naměřených hodnot, získáme křivku, kterou můžeme vidět na obrázku 47. Abychom získali graf, který ukazuje profil měřeného svazku, musíme provést diferenci jednotlivých hodnot. Na tuto operaci má Matlab funkci `diff`. V našem případě jsme svazek laseru postupně zakrývali, difference nám tedy vyšly záporné (levý graf na obrázku 48). Abychom získali konvenční podobu grafu pro difference, bylo potřeba



Obrázek 46: Uživatelské rozhraní pro ovládání motorku u metody knife-edge

vynásobit vektor hodnot vzniklý diferencováním původních naměřených hodnot číslem -1. Vzniklý graf je na obrázku 48 vpravo.

Graf vzniklý diferencí naměřených hodnot má již tvar podobný tomu, jak by mohl profil měřeného svazku vypadat. Je však zřejmé, že měřený profil neměl tak mnoho různých výkonnostních špiček, jak by mohlo vypadat z vykresleného grafu. Bylo tedy třeba provést regresi grafu. Na tuto operaci má Matlab integrovaný nástroj, který se nazývá Curve fitting tool. Návod jak pomocí tohoto nástroje provést regresi ukazuje obrázek 49. Graf vzešlý z regrese má již podobu měřeného profilu optického svazku.

Souhrnný seznam příkazů vedoucí k vykreslení profilu optického svazku je vidět ve výpisech 8 a 9. Výpis 8 ukazuje, jak je třeba naměřená data připravit pro provedení regrese. Výpis 9 ukazuje zpracování dat po regresi a vykreslení finálního profilu měřeného svazku.

```

file_name = 'laser3.knife.y.txt'; % Soubor obsahující naměřená data
step_size = 0.025;
distance = 4;

data = load(file_name);
intensity = -diff(data);
axis_x = [0:step_size:distance-step_size];
cftool; % Spustí nástroj Curve fitting tool

```

Výpis 8: Příprava dat pro regresi

```

file_fitted = 'fitted.txt'; % Soubor s uloženými hodnotami z regrese a analýzy v nástroji Curve
fitting tool
fitted = load( file_fitted );
fitted = fitted * (1/max(fitted)); % Přepočítá hodnoty na ose Y tak, aby maximální hodnota byla
rovna 1
plot(axis_x, fitted);
title('Laser beam profile');
xlabel('Width [mm]');
ylabel('Intensity (a.u.)');

```

Výpis 9: Zpracování dat z regrese

9.3 Experimentální měření

Účelem této metody není vykreslení 3D grafu zobrazujícího co nejpřesněji profil měřeného optického svazku. Toto není totiž už z principu této metody možné. Hlavním účelem této metody je zjištění rádiusu svazku. Pro zjištění tohoto parametru totiž nepotřebujeme znát přesný tvar svazku.

Touto metodou bylo rovněž provedeno měření pouze laseru MELLES GRIOT 25-LHP-151-230. Důvod je podobný jako u měření CCD kamerou. Kvůli silné divergenci svazku samostatných laserových diod nebylo možno zachytit celý svazek na plochu detektoru optického výkonu.

Laser MELLES GRIOT 25-LHP-151-230 byl změřen ve dvou osách, 0° a 90° . Postup popsáný výše se musel provést pro každou osu zvlášť. Obrázek 50 ukazuje konečnou podobu profilu optického svazku změřeného pomocí metody knife-edge.

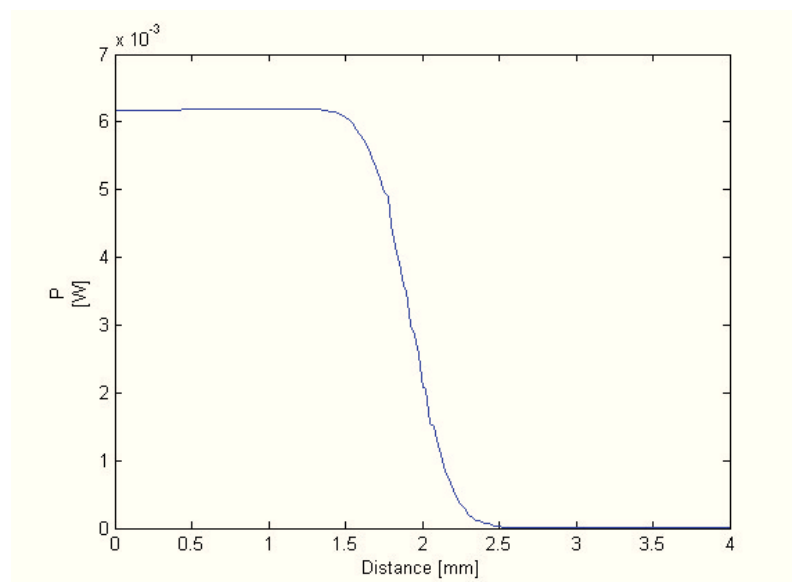
Výpis 10 je souhrn příkazů, které ukazují, jak vypočítat rádius svazku v místě poklesu intenzity na $1/e^2$ maximální intenzity.

```

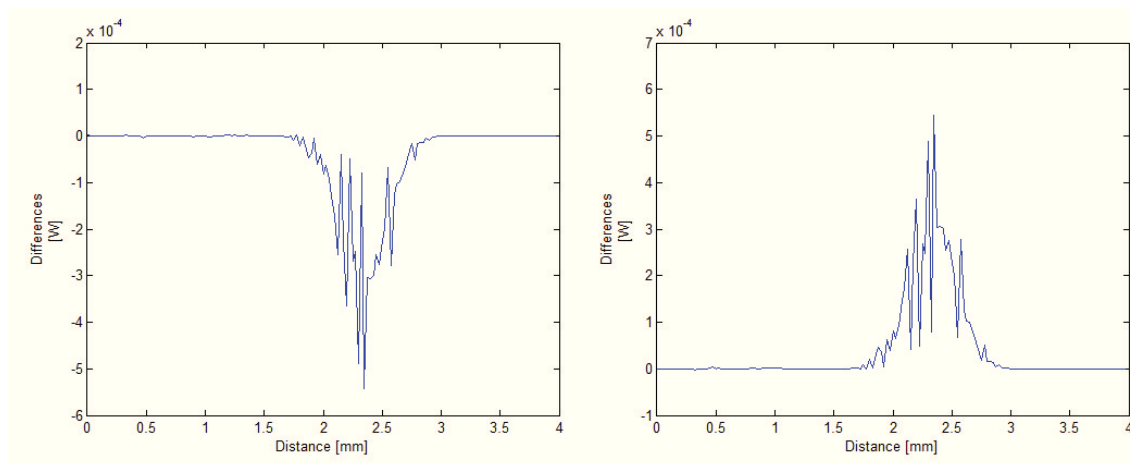
file_fitted = 'fitted.txt'; % Soubor s uloženými hodnotami z regrese a analýzy v nástroji Curve
fitting tool
fitted = load( file_fitted );
fitted = fitted * (1/max(fitted)); % Přepočítá hodnoty na ose Y tak, aby maximální hodnota byla
rovna 1
[r] = find( fitted > 0.1352 & fitted < 0.1354);
radius = r(2) - r(1);

```

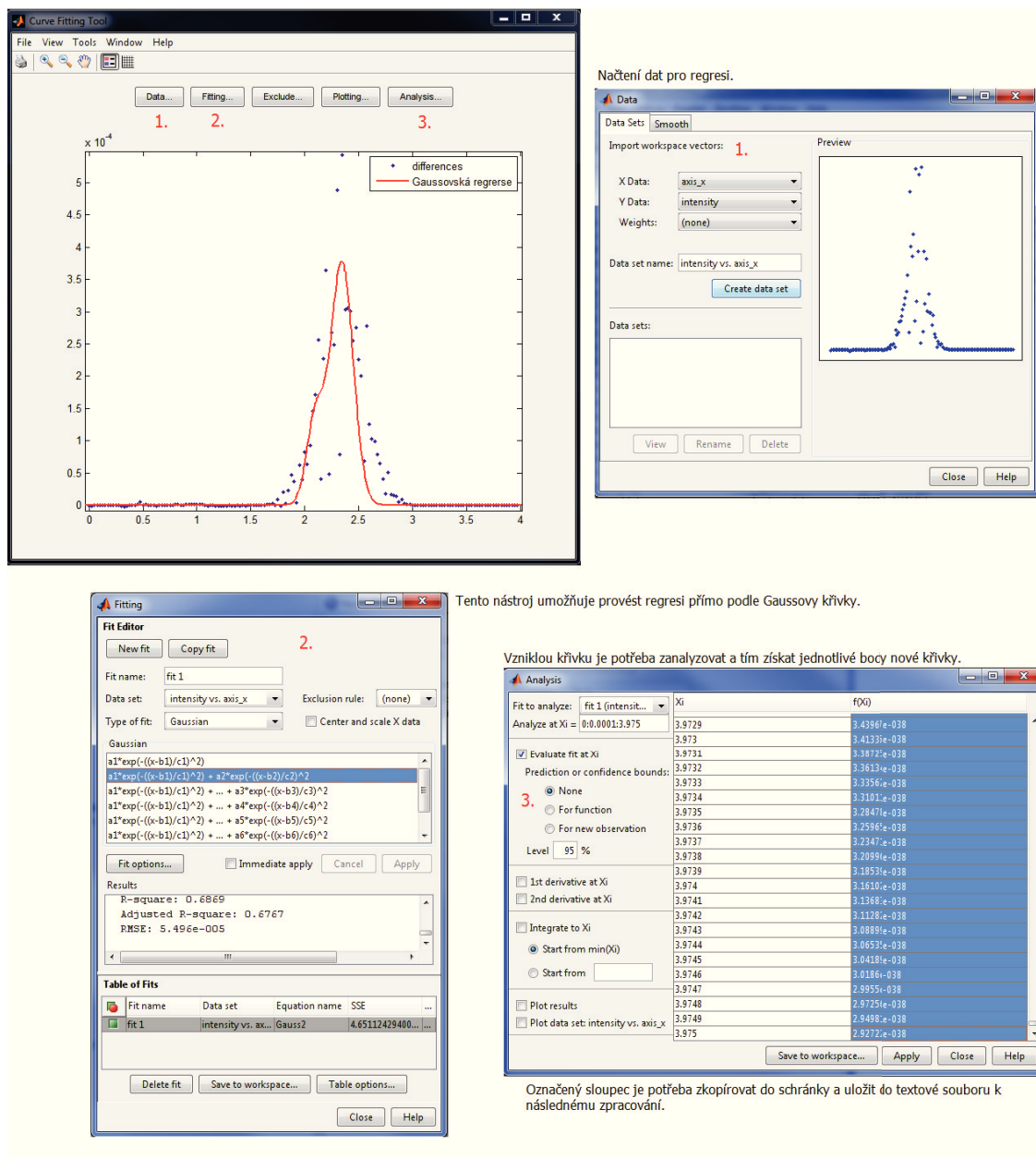
Výpis 10: Výpočet rádiusu optického svazku



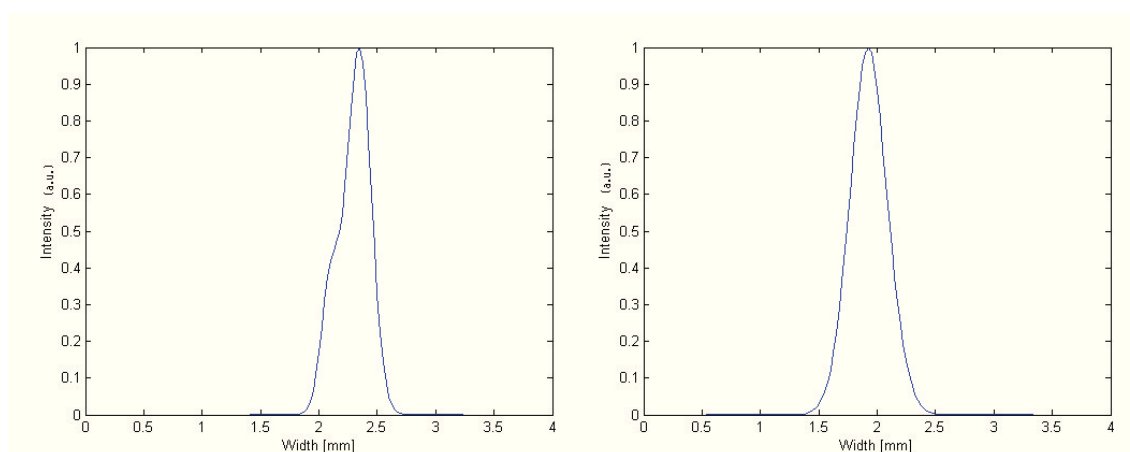
Obrázek 47: Graf naměřených hodnot postupného zakrývání svazku



Obrázek 48: Grafy diferencí



Obrázek 49: Návod pro provedení regrese v nástroji Curve fitting tool



Obrázek 50: Profil optického svazku laseru MELLES GRIOT 25-LHP-151-230 změřeného metodou knife-edge, vlevo v ose 0° , vpravo v ose $+90^\circ$

10 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo prozkoumat, popsat a vytvořit metody pro měření profilu optického svazku.

Byly realizovány celkem tři metody, scanning pinhole, knife-edge a měření pomocí CCD kamery. Při návrhu metod byly co nejvíce využity možnosti aplikace Matlab. Veškeré možné zautomatizování vytvořených metod bylo provedeno pomocí skriptů psaných právě pro tuto aplikaci.

Nejvyšší možné automatizace bylo dosaženo u metody scanning pinhole. Skript aplikace Matlab ovládá měření od spuštění motorků až po vykreslení grafu profilu optického svazku.

Metodu měření pomocí CCD kamery nebylo možné zcela zautomatizovat, jelikož použitá kamera nemá ovladače pro aplikaci Matlab. Pro pořízení snímku tak bylo potřeba využít jiný software.

Metoda knife-edge byla zautomatizována jen částečně. Samotné měření bylo vyřešeno pomocí skriptu, ale následné zpracování naměřených dat již vyžaduje zásah uživatele.

Experimentální měření provedená pro každou metodu ukázala, že pokud potřebujeme získat rychlou představu o profilu optického svazku, jako nejvhodnější se jeví metoda CCD kamery. Naopak časově nejnáročnější je metoda scanning pinhole. Jedná se však o nejuniverzálnější metodu, protože je schopná změřit i optické svazky s velkou divergencí. Metoda knife-edge je vhodná hlavně pokud potřebujeme relativně rychle získat představu o rádiu svazku.

Cykly vytvořené pro ovládání motorků se ukázaly jako vhodné rovněž pro ovládání motorků v zařízení pro měření optického laserového pojítka.

Pokračováním této práce by mohlo být vytvoření ucelených nástrojů pro analýzu naměřených profilů optických svazků. Dalším možným vývojem je vytvoření softwarové části realizovaných metod nezávisle na aplikaci Matlab.

Radim Just

11 Reference

- [1] Paschotta, Rüdiger. *Encyclopedia of Laser Physics and Technology* [online]. 2011-02-18 [cit. 2011-04-29]. Beam Divergence. Dostupné z WWW: http://www.rp-photonics.com/beam_divergence.html.
- [2] Paschotta, Rüdiger, *Encyclopedia of Laser Physics and Technology* [online]. 2011-04-29 [cit. 2011-04-29]. Beam Radius. Dostupné z WWW: http://www.rp-photonics.com/beam_radius.html.
- [3] Paschotta, Rüdiger, *Encyclopedia of Laser Physics and Technology* [online]. 2011-04-29 [cit. 2011-04-29]. Beam Parameter Product. Dostupné z WWW: http://www.rp-photonics.com/beam_parameter_product.html.
- [4] *Wikipedia* [online]. 2011-04-23 [cit. 2011-04-29]. Gaussian beam. Dostupné z WWW: http://en.wikipedia.org/wiki/Gaussian_beam.
- [5] *Thorlabs.com - CCD Camera Beam Profiler* [online]. c1999-2011 [cit. 2011-04-29]. CCD Camera Beam Profiler. Dostupné z WWW: http://www.thorlabs.de/NewGroupPage9.cfm?ObjectGroup_ID=3483.
- [6] *Thorlabs.com - Absorptive and Reflective Neutral Density Filter Kits* [online]. c1999-2011 [cit. 2011-04-29]. Absorptive and Reflective Neutral Density Filter Kits. Dostupné z WWW: http://www.thorlabs.de/NewGroupPage9.cfm?ObjectGroup_ID=689.
- [7] *Thorlabs.com - Z800 Series Motorized DC Servo Actuator Operating Manual* [online]. c1999-2011 [cit. 2011-04-29]. Z800 Series Motorized DC Servo Actuator Operating Manual. Dostupné z WWW: <http://www.thorlabs.de/Thorcat/17600/17630-D01.pdf>.
- [8] *Thorlabs.com - Operation Manual PM100* [online]. 2006 [cit. 2011-04-29]. Operation Manual PM100. Dostupné z WWW: <http://www.thorlabs.com/Thorcat/12200/12271-D02.pdf>.
- [9] *Šíření a transformace gaussovského svazku, měření příčného profilu* [online]. 2010 [cit. 2011-04-29]. Šíření a transformace gaussovského svazku, měření příčného profilu. Dostupné z WWW: <http://people.fjfi.cvut.cz/blazejos/public/ul7.pdf>.
- [10] *GNU Plot homepage* [online]. 2011 [cit. 2011-04-29]. Gnuplot homepage. Dostupné z WWW: <http://www.gnuplot.info/>.
- [11] *ActiveX control of APT Thorlabs positioning stages - File Exchange - MATLAB Central* [online]. 2006 [cit. 2011-04-29]. ActiveX control of APT Thorlabs positioning stages. Dostupné z WWW: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/12727>.

-
- [12] *APC Laser Diode* [online]. 2009 [cit. 2011-04-29]. APC Laser Diode. Dostupné z WWW:
<http://www.lasercomponents.com/fileadmin/user_upload/home/Datasheets/divers-vis/ari/apcld/adl-65075ta2.pdf>.
- [13] *Camera Specification BASLER A631f* [online]. 2009 [cit. 2011-04-29]. Camera Specification BASLER A631f. Dostupné z WWW:
<<http://www.crijolanta.com.pl/produkty/basler/a631f-emva.pdf>>.
- [14] Roundy, Carlos B. *Current Technology of Laser Beam Profile Measurements* [online]. 2010 [cit. 2011-04-29]. Current Technology of Laser Beam Profile Measurements. Dostupné z WWW:
<<http://aries.ucsd.edu/LMI/TUTORIALS/profile-tutorial.pdf>>.
- [15] *BeamMaster Knife-edge Beam Profiler Catalogue* [CD /doc/man]
- [16] *3D Grafy* [online]. 2010 [cit. 2011-04-29]. 3D Grafy. Dostupné z WWW:
<http://trubka.fs.cvut.cz/downloads/FRVS07/html/vykresleni_dat_v_matlabu.2.html>.
- [17] *MATLAB - Images and Matrices Demo* [online]. c1984-2011 [cit. 2011-04-29]. Images and Matrices. Dostupné z WWW:
<<http://www.mathworks.com/products/matlab/demos.html?file=/products/demos/shipping/matlab/imagedemo.html#1>>.
- [18] SANDBERG, Kristian. *Introduction to image processing in Matlab 1* [online]. 2011 [cit. 2011-04-29]. Introduction to image processing in Matlab 1. Dostupné z WWW:
<http://amath.colorado.edu/courses/5720/2000Spr/Labs/Worksheets/Matlab_tutorial/matlabimpr.html>.
- [19] *2-D median filtering - MATLAB* [online]. c1984-2011 [cit. 2011-04-29]. Medfilt2 . Dostupné z WWW:
<<http://www.mathworks.com/help/toolbox/images/ref/medfilt2.html>>.

A Obsah CD

/doc/text - Text diplomové práce

/doc/man - Manuály ve formátu pdf

/src - Skripty aplikace Matlab pro jednotlivé metody

/data - Soubory s naměřenými hodnotami